



Universidad
Carlos III de Madrid

DISEÑO, CONTROL Y CONSTRUCCIÓN DE UN EXTRUSOR DE FILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D

Diego Trapero Moreno

24 de septiembre de 2014

Tutor:

Pablo Zumel Vaquero

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Tabla de contenidos

TABLA DE CONTENIDOS	3
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
1 INTRODUCCIÓN	14
1.1 Objetivos del proyecto	15
1.2 Estructura del documento	16
2 ANÁLISIS	17
2.1 Extrusión	17
2.1.1 El extrusor	17
2.1.2 Componentes de un extrusor	18
2.1.2.1 El husillo	18
2.1.2.2 El barril	18
2.1.2.3 La tolva y apertura de alimentación	18
2.1.2.4 Sistemas de calentamiento y enfriamiento	19
2.1.2.5 La boquilla	19
2.1.2.6 El sistema motor	20
2.1.2.7 Sistemas de instrumentación y control	20
2.1.3 Zonas funcionales de un extrusor	20
2.1.4 La línea de extrusión	20
2.2 El husillo	21
2.2.1 Parámetros del husillo	22
2.2.2 El husillo estándar	23
2.3 Polímeros	23
2.3.1 Propiedades de los polímeros	24
2.3.1.1 Viscosidad	25
2.3.1.2 Melt Flow Index (MFI)	25
2.3.1.3 Temperatura de fusión y transición vítrea	26
2.4 Modelos cuantitativos del extrusor	26
2.4.1 Análisis dimensional de un extrusor	26
2.4.2 Modelo de placa plana	27
2.4.2.1 Hipótesis del modelo	27

2.4.2.2 Geometría del problema	27
2.4.2.3 Solución del modelo	28
2.4.2.4 Interpretación de la solución	29
2.4.3 Modelo de la característica del extrusor y la boquilla	30
2.4.3.1 Característica del extrusor	30
2.4.3.2 Característica de la boquilla	31
2.4.3.3 Punto de operación	31
2.5 Calidad del filamento	32
2.5.1 Factores que influyen en la calidad del filamento	32
2.5.1.1 Calidad del material	32
2.5.1.2 Calidad dimensional	33
2.5.2 Métricas de calidad dimensional	33
2.5.3 Procedimiento para medir el filamento	34
2.5.4 Calidad del filamento comercial	36
2.6 Análisis de las soluciones existentes	36
2.7 Motivación y análisis económico del problema	41
2.7.1 <i>Crowdfunding</i> de extrusores de filamento	41
3 DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y ENSAYO	43
3.1 Procedimiento	43
3.1.1 Fases del desarrollo del extrusor	43
3.2 Herramientas empleadas	44
3.2.1 iPython	44
3.2.2 FreeCAD	45
3.2.3 Github	46
3.2.4 Software de impresión 3D	47
3.3 Cálculos previos	47
3.3.1 Husillo	47
3.3.1.1 Geometría del husillo	48
3.3.1.2 Diámetro del husillo	49
3.3.2 Estimación del caudal másico del extrusor	49
3.3.3 Escalado de las soluciones existentes	50
3.3.4 Simulación	51
3.3.4.1 Estimación del caudal mediante correlación empírica	51
3.3.4.2 Modelos de la característica del extrusor y la boquilla	52
3.3.4.3 Sensibilidad de la calidad del filamento	52
3.3.4.4 Resultados finales	53
3.3.4.5 Conclusiones de la simulación	54
3.4 Componentes iniciales	55
3.4.1 Barril	55
3.4.1.1 Operaciones de mecanizado	56
3.4.2 Motor	57
3.4.2.1 Datos del motor, reductora y encoder	57
3.4.2.2 Control del motor	58
3.4.3 Elementos mecánicos básicos	59

3.4.4 Raíl	60
3.4.5 Polímero de extrusión	61
3.5 Prototipo inicial	62
3.5.1 Descripción del prototipo	62
3.5.1.1 Electrónica del prototipo	63
3.5.1.2 Piezas impresas del prototipo	64
3.5.2 Evaluación del prototipo	64
3.5.2.1 Calidad del filamento	65
3.5.3 Mejoras propuestas sobre el prototipo	65
3.6 Modelo final	66
3.6.1 Diseño mecánico	66
3.6.1.1 Cuerpo del extrusor	66
3.6.1.2 Piezas impresas	67
3.6.1.2.1 Consideraciones sobre el uso de piezas impresas	67
3.6.1.2.2 Archivos 3D del proyecto	68
3.6.1.2.3 Parámetros de impresión	68
3.6.1.3 Montaje del modelo final	72
3.6.2 Diseño electrónico	72
3.6.2.1 Arduino Mega	72
3.6.2.1.1 Elección de la plataforma Arduino	73
3.6.2.1.2 Especificaciones del Arduino Mega	73
3.6.2.1.3 Programación	74
3.6.2.1.4 Recursos empleados	74
3.6.2.2 Control del motor	75
3.6.2.3 Calentadores	76
3.6.2.3.1 Elemento calefactor	76
3.6.2.3.1.1 Dimensionamiento del elemento calentador	77
3.6.2.3.1.2 Circuito de control del elemento calefactor	77
3.6.2.3.1.3 Elección de los componentes	78
3.6.2.3.1.4 Circuito de acondicionamiento del termistor	79
3.6.2.3.1.5 Elección de los componentes	80
3.6.2.3.1.6 Calibración y generación de la tabla de verdad del termistor	80
3.6.2.3.1.7 Control de la temperatura	81
3.6.2.3.2 Placa de control de calentadores y ventiladores	81
3.6.2.3.3 Pantalla LCD con encoder pulsable	82
3.6.2.3.4 Escudo de conexiones de la placa	84
3.6.2.3.5 Sistema de potencia	84
3.6.2.3.5.1 Convertidores DC/DC	85
3.6.2.4 Software	86
3.6.2.4.1 Librerías externas empleadas	86
3.6.2.4.2 Extruder, librería del extrusor	87
3.6.2.4.2.1 Clases de la librería	87
3.6.2.4.2.1.1 La clase Extruder	88
3.6.2.4.2.1.2 La clase Heater	89
3.6.2.4.2.1.3 La clase Drive	90
3.6.2.4.2.1.4 La clase Puller	91
3.6.2.4.2.1.5 La clase Thermistor	91
3.6.2.4.2.1.6 Las clases externas: PID, Encoder y Servo	91
3.6.2.4.2.1.7 Archivo de configuración	92
3.6.2.4.3 Lógica de control del programa	93
3.6.2.4.4 Interfaz de usuario	95

3.6.3.4.1 Elementos de la interfaz	95
3.6.3.4.2 Interacción con el usuario	96
3.6.4 Línea de extrusión	96
3.6.4.1 <i>Puller</i>	96
3.6.4.2 Sistema de refrigeración	97
3.6.4.3 Control de los ventiladores	98
3.6.4.3.1 Elección de los componentes	99
3.6.4.4 Guías de filamento	99
3.7 Análisis de costes	100
3.7.1 Coste de materiales	100
3.7.2 Coste de desarrollo	100
3.7.3 Coste unitario del producto	101
3.8 Evaluación del modelo final	102
3.8.1 Prueba de extrusión	102
3.8.2 Pruebas de impresión	104
4 CONCLUSIONES	106
4.1 Resumen de características del extrusor	106
4.2 Cumplimiento de objetivos	112
4.3 Comparación con otros modelos	114
4.4 Mejoras	115
4.5 Valoración final	116
5 BIBLIOGRAFÍA	118
6 ANEXOS	122
6.1 Hoja de datos del ABS MAGNUM 8391	123
6.2 Esquemas electrónicos	124
6.3 Diagrama UML de la librería Extruder	125
6.4 Lista de materiales	126
6.5 Pruebas de calidad de filamento	127

Índice de tablas

Tabla 1 Propiedades de polímeros empleados en extrusión. Fuente: [11].....	24
Tabla 2 Tabla de Melt Flow Index (MFI) de referencias de ABS usadas en impresión 3D, resultados según ISO 1133 a 220°/10kg. Fuentes: [13], [14].....	25
Tabla 3 Comparación de extrusores de filamento. Fuentes: [20]–[26].....	37
Tabla 4 Campañas de crowdfunding de proyectos de extrusores. El precio unitario puede diferir de la recaudación unitaria al existir múltiples opciones de aportación económica al proyecto. Fuentes: [22], [24]–[27].	42
Tabla 5 Resultados de la correlación empírica para diferentes velocidades de husillo	50
Tabla 6 Resultados de simulación.....	53
Tabla 7 Datos del motor.	57
Tabla 8 Datos de la reductora.....	58
Tabla 9 Datos del encoder.	58
Tabla 10 Parámetros de impresión para cada pieza. El tiempo de impresión y la masa son estimaciones del software de impresión.	69
Tabla 11 Especificaciones del Arduino Mega 2560. Fuente: .[36]	73
Tabla 12 Pines empleados.	74
Tabla 13 Componentes del circuito del calentador.....	78
Tabla 14 Componentes del circuito de acondicionamiento del termistor.	80
Tabla 15 Componentes del circuito de control de los ventiladores.	99
Tabla 16 Resumen del cumplimiento de las especificaciones del proyecto.	113
Tabla 17 Tabla comparativa del modelo diseñado y las soluciones previas. Fuentes: [20]–[26]	114

Índice de figuras

Figura 1 Diagrama de un extrusor. Fuente: [6].	17
Figura 2 Diferentes husillos de extrusión. Fuente: http://www.screwbarrels.co.in/screw-barrel-for-extruder.htm	18
Figura 3 Granza de ABS.	19
Figura 4 Línea de extrusión de tubos, formada por extrusor (extruder), tanque de refrigeración (wáter trough), medidor láser (laser gage), sistema de extracción (puller) y cortador (cutter). Fuente: [3, p. 36].....	21
Figura 5 Diagrama del diámetro y longitud de un husillo de extrusión.	22
Figura 6 Dimensiones de un husillo. Fuente: http://www.slscrewbarrel.com/UploadFile/201063191736307.jpg	23
Figura 7 Geometría y sistema de referencia del modelo de placa plana (Fuente: [17]).	28
Figura 8 Componentes del perfil de velocidades en z: flujo viscoso y de presión (fuente: [7])	29
Figura 9 Características del extrusor y la boquilla. Fuente: [6].	31
Figura 10 Hoja de toma de datos para determinar la calidad del filamento.	35
Figura 11 Ejemplo de parámetros de calculados para una muestra de filamento.	36
Figura 12 Lyman Filament Extruder versión 3, junto con tanque de refrigeración por agua, puller y winder.	38
Figura 13 Filastruder	38
Figura 14 X3uder.....	39
Figura 15 ExtrusionBot.....	39
Figura 16 STRUdittle.....	40
Figura 17 FilaFab.....	40
Figura 18 Diagrama de Gantt de la programación del proyecto.	44
Figura 19 Captura de uno de los cuadernos de iPython de este proyecto.	45
Figura 20 Captura de pantalla de FreeCAD.	46
Figura 21 Captura del repositorio de GitHub del proyecto.	47
Figura 22 Imagen de la broca usada como husillo.....	48
Figura 23 Imagen de la broca usada como husillo.....	48
Figura 24 Caudal del extrusor (a 50rpm) vs Diámetro. Basado en la correlación empírica del diámetro.	51
Figura 25 Caudal del extrusor vs velocidad del extrusor. Basado en la correlación empírica del diámetro.	52
Figura 26 Característica del extrusor y la boquilla.....	52
Figura 27 Resultados del análisis de sensibilidad	53
Figura 28 Conjunto del barril del extrusor.	56
Figura 29 Imagen del aislante de corcho.	56
Figura 30 Imagen del motor empleado, 3273E de Phidgets. El conjunto contiene un motor DC, reductora y encoder óptico (Fuente: http://www.phidgets.com/images/3273E_0_Web.jpg)	57
Figura 31 Cojinete axial.....	59
Figura 32 Rodamiento axial de bolas.	59
Figura 33 Vistas superior e inferior del acoplador de ejes.	60

Figura 34 Detalle de los elementos mecánicos en el modelo 3D. De derecha a izquierda, se observan el motor (negro y gris), un modelo simplificado del husillo (cilindro gris) los acopladores del eje (rojo), el cojinete axial (dorado), rodamiento axial (gris) y el cojinete radial (dorado).....	60
Figura 35 Imagen de las tuercas en T y tornillos empleados para fijar las piezas al raíl 61	61
Figura 36 Detalle de la fijación de las piezas al raíl.....	61
Figura 37 Imagen del prototipo inicial del extrusor.....	62
Figura 38 Imagen de la electrónica del prototipo.	63
Figura 39 Piezas del cuerpo del prototipo. De izquierda a derecha, son tolva y soporte del barril, soporte del cojinete axial y soporte del motor.....	64
Figura 40 Modelo 3D del extrusor.....	66
Figura 41 Vista ensamblada del cuerpo del extrusor.	67
Figura 42 Vista explotada del cuerpo del extrusor, en la que se pueden observar las 4 piezas impresas que lo componen.	67
Figura 43 Captura del IDE de Arduino.	72
Figura 44 Imagen del driver MC33926 de Pololu. Fuente: Pololu (http://www.pololu.com/picture/view/0J1815)	75
Figura 45 Diferentes fases del proceso de construcción del elemento calefactor.	77
Figura 46 Circuito del calentador.	78
Figura 47 Circuito de acondicionamiento del termistor.....	79
Figura 48 Curva de calibración del circuito del termistor. Se puede ver señalado en un recuadro azul el rango de temperaturas de mayor interés.....	80
Figura 49 Captura de pantalla del código de generación de la tabla de verdad del termistor.	81
Figura 50 Placa de calentadores y ventiladores	82
Figura 51 Pantalla LCD y encoder, montado sobre el soporte impreso.....	83
Figura 52 Escudo de conexiones conectado a la placa Arduino Mega.	84
Figura 53 Fuente de alimentación.	85
Figura 54 Convertidor DC/DC basado en el LM2596.	86
Figura 55 Diagrama UML simplificado de la librería, donde se muestran las relaciones de composición entre clases.	88
Figura 56 Representación UML de la clase Extruder.	89
Figura 57 Representación UML de la clase Heater.....	90
Figura 58 Representación UML de la clase Drive.....	90
Figura 59 Representación UML de la clase Puller.....	91
Figura 60 Representación UML de la clase Thermistor.....	91
Figura 61 Representación UML de la clase PID.	92
Figura 62 Representación UML de la clase Encoder.	92
Figura 63 Representación UML de la clase Servo.	92
Figura 64 Fragmento del archivo de configuración del extrusor, Configuration.h.....	93
Figura 65 Diagrama de flujo de un sketch de Arduino.	93
Figura 66 Diagrama de flujo de la función setup()......	94
Figura 67 Diagrama de flujo de la función loop().	94
Figura 68 Imagen de la interfaz con pantalla LCD y encoder pulsable.	95
Figura 69 Puller.....	97
Figura 70 Sistema de refrigeración.....	98
Figura 71 Circuito de control de los ventiladores.	99

Figura 72 Guía de filamento.....	100
Figura 73 Semicubo de calibración impreso con filamento extruido con el extrusor (primer plano) y semicubo de control.	104
Figura 74 Guía de filamento impresa con filamento extruido con el extrusor (primer plano) y pieza de control.	105
Figura 75 Llave fija impresa con filamento extruido con el extrusor (primer plano) y pieza de control.	105
Figura 76 Línea de extrusión	107
Figura 77 Línea de extrusión	107
Figura 78 Línea de extrusión	108
Figura 79 Extrusor.....	109
Figura 80 Cuerpo del extrusor.....	109
Figura 81 Puller y sistema de refrigeración.	110
Figura 82 Electrónica.....	110
Figura 83 Electrónica de control de la línea.	111
Figura 84 Electrónica de potencia (fuente y convertidores DC/DC).	111
Figura 85 Interfaz (pantalla LCD con encoder pulsable).	112

Resumen

En este trabajo de fin de grado se presenta el proceso de diseño, construcción y ensayo de un sistema de extrusión que produce filamento para uso en impresión 3D. El sistema está compuesto de un extrusor, sistema de refrigeración del filamento y sistema de extracción del producto extruido. Además, se ha implementado un sistema electrónico que permite el control de las variables del proceso de extrusión.

El producto desarrollado se ha diseñado adoptando algunas de las premisas de los movimientos de hardware libre: coste reducido, reproducibilidad del diseño y fuentes puestas a disposición de cualquier usuario u organización.

El resultado final es un sistema de extrusión sobre el que se han realizado pruebas para comprobar su funcionalidad y la calidad del producto extruido. Se ha podido documentar que el filamento producido en este proyecto se puede emplear en una impresora 3D convencional.

Abstract

This bachelor thesis presents the design, construction and testing of an extrusion system aimed at producing plastic filament for use in 3D printing. The system is composed of an extruder, a cooling system and a system for the extraction of the extruded product. An electronic system has also been implemented in order to control the process variables.

The developed product has been designed according to some of the principles of free hardware: low cost, replicable design and sources available to any person or institution.

The final result is an extrusion system that has been object of testing in order to evaluate its functionality and the quality of the extruded product. The filament produced in this project has been successfully printed in a conventional 3D printer machine.

1 Introducción

La impresión 3D es un fenómeno en auge, una tecnología que tiene la capacidad de revolucionar tanto la fabricación tradicional como la posibilidad de expresar la creatividad de los usuarios domésticos.

A pesar de que la primera patente de una impresora 3D se presentó en 1984 [1] y de que muchas empresas emplean la impresión 3D a escala industrial, esta tecnología ha dado el salto al gran público en los últimos años.

La fuerza más significativa detrás de la democratización de la impresión 3D es el fenómeno RepRap, iniciado en 2005 por Adrian Bowyer, profesor de la Universidad Bath (Reino Unido). El objetivo inicial del proyecto RepRap era la construcción de una máquina capaz de replicarse a sí misma mediante impresión 3D. En la actualidad, las impresoras open source son descendientes directos de los primeros modelos de Bowyer. La mejora de los modelos originales ha sido posible gracias a las aportaciones de una comunidad abierta de usuarios; éstos han evolucionado el producto hasta el punto en el que nos encontramos hoy, en el que las impresoras RepRap han llegado a una gran cantidad de usuarios domésticos. Este fenómeno se engloba dentro del llamado *hardware libre*.

La principal aportación del proyecto RepRap ha sido la disminución de las barreras de entrada a la impresión 3D de tecnología FDM (*fused deposition modeling*). Ésto ha permitido crear un ecosistema de empresas, comunidades y usuarios que están extendiendo el avance de la tecnología. Un ejemplo de cómo esta filosofía libre ha revertido en el mundo empresarial es el caso de Makerbot: una empresa que en 2009 desarrollaba y vendía impresoras libres con tecnología RepRap; en 2013 fue adquirida por Staratsys por la suma de 403 millones de dólares y en la actualidad intenta desarrollar un modelo comercial más convencional, basado en productos propietarios.

Este trabajo de fin de grado pretende, mediante las premisas empleadas por el movimiento RepRap (fuentes abiertas, reproducibilidad de los diseños por usuarios domésticos, costes contenidos) ofrecer una alternativa a la fabricación convencional de filamento para impresión 3D.

El filamento es el producto que emplean las impresoras 3D FDM para producir los modelos sólidos; se trata de un cable plástico que se suele comercializar enrollado en un carrete. El proceso de transformación del filamento consiste en la extrusión de una resina polimérica (en forma de granulado) para dar lugar a un hilo continuo y macizo de plástico. La fabricación de filamento requeriría pues, la creación de un extrusor de filamento acorde a los principios expuestos.

La idea de crear un extrusor de filamento económico y open source no es nueva y ya ha sido explorada por otros autores. Se debe hacer notar que ya existen soluciones similares a la que se pretende desarrollar en este proyecto, además de usuarios de esta tecnología. Este tipo de usuarios no requieren de sus extrusores las mismas exigencias que los productores comerciales; el ánimo que impulsa a la mayoría es el explorar estos procesos y la simple satisfacción de construir y utilizar su propia máquina.

El presente diseño no cumple con los estándares requeridos por la industria, puesto que se dirige a un público diferente. Difícilmente se podría emplear para la producción comercial de filamento, donde las especificaciones de capacidad están muy por encima de los obtenibles con este producto.

Sin embargo, se pretende facilitar un diseño abierto y un corpus de conocimiento que pueda ser aprovechado por personas u organizaciones interesadas en esta área, con el objeto de construir este modelo o emplearlo como plataforma de sus propias soluciones.

El objetivo de este proyecto quedaría cumplido si efectivamente el esfuerzo invertido en este diseño pudiera ser aprovechado por aquellos ajenos a su desarrollo inicial.

1.1 Objetivos del proyecto

El objetivo del proyecto es el diseño, construcción y ensayo de un extrusor de filamento para impresión 3D, diseñado bajo los criterios de:

- Coste y tamaño reducido.
- Fuentes abiertas a disposición de cualquier persona y organización.
- Procesos de fabricación y componentes replicables sin necesidad de tener acceso a herramientas o proveedores especializados, para favorecer la replicabilidad del diseño.

Los objetivos iniciales del proyecto se han traducido en unas especificaciones mínimas y a una serie de indicaciones, de carácter cualitativo, que pretenden guiar el proceso de desarrollo.

Las especificaciones mínimas que se han establecido son:

1. Coste de los materiales de cada unidad menor de 500€.
2. Capacidad mínima de 0.25kg/h (1kg cada 4 horas).
3. El material de extrusión será ABS.
4. El filamento producto de la extrusión debe ser utilizable por una impresora 3D.

Las directrices que se observarán durante el proceso de desarrollo, que tienen un enfoque cualitativo, son:

1. Cuando sea posible, el proyecto debe emplear herramientas, productos y métodos open source.
2. Los componentes empleados serán preferiblemente normalizados, estándar o fáciles de adquirir por cualquier persona.
3. Se evitarán el uso de operaciones de mecanizado para la producción del extrusor, mas allá del taladrado con herramienta de mano.
4. Se liberará la documentación y fuentes del diseño en plataformas accesibles a otros usuarios interesados en el proyecto. Para ello se emplea un repositorio online con todos los archivos generados durante el desarrollo del proyecto [2].

1.2 Estructura del documento

Esta memoria se divide en 4 secciones de contenido: Introducción, Análisis, Diseño, construcción y ensayo y Conclusiones. Además de estos 4 apartados, al final del documento puede consultarse la Bibliografía utilizada y Anexos.

Los temas que se tratan en cada una de las secciones son:

- En la presente **Introducción** se exponen una breve motivación del problema, los objetivos del proyecto y la estructura del documento.
- En la sección de **Análisis** puede encontrarse todo el estudio previo a la solución del problema. Se parte de la visión general de la extrusión de polímeros (2.1, 2.2, 2.3) hasta llegar a los modelos cuantitativos (2.4) y de calidad (2.5), conceptos aplicados que tendrán relevancia en la fase de diseño. También se analizan las soluciones existentes al problema (2.6) y las cuestiones económicas relacionadas (2.7).
- En la sección de **Diseño, construcción y ensayo** se documenta el proceso iterativo que ha dado lugar al extrusor definitivo. Se encuentra el procedimiento (3.1), y herramientas empleados (3.2), así como las diferentes etapas del desarrollo: cálculos previos (3.3), componentes iniciales (3.4), prototipo inicial (3.5) y modelo final (3.6). También se realiza el análisis de coste (3.7) y evaluación del extrusor desarrollado (3.8). En esta sección se puede encontrar la planificación del proyecto (3.1.1) y el presupuesto y costes del mismo (3.7.1, 3.7.2, 3.7.3).
- En la sección de **Conclusiones** se expresa y justifica la valoración final del proyecto. Se ofrece un resumen de las características definitivas del extrusor (4.1), la evaluación del cumplimiento de los objetivos iniciales (0), una comparación con otros modelos similares (4.3), se sugieren una serie de posibles mejoras (4.4) y finalmente se hace una valoración global del resultado (4.5).

2 Análisis

2.1 Extrusión

En esta sección se presenta el concepto de extrusor, el proceso de extrusión y línea de extrusión. La información para su elaboración se ha extraído de las referencias [3]–[5] de la bibliografía. Se recomienda la consulta de [3], *Understanding Extrusion*, como un manual introductorio sobre extrusión, mientras que [4] y [5] permiten la profundización sobre la disciplina.

2.1.1 El extrusor

Un extrusor es una máquina diseñada para forzar un material a través de una boquilla o cabezal.

En el contexto de este trabajo el término extrusor se refiere más específicamente a una máquina que funde y transporta material plástico para hacerlo pasar por una boquilla. Existen diversos mecanismos para llevar a cabo esta función: un pistón, uno o varios husillos (tornillos). El caso desarrollado se refiere a un extrusor de un solo husillo.

Un extrusor también se puede entender desde el punto de vista del proceso de fabricación que realiza: se alimenta con material plástico en forma de granulado (granza, pellets) y lo transforma en un producto extruido.

En la Figura 1 se puede observar un diagrama de un extrusor plástico de un husillo, en el que se indican los diferentes componentes que lo forman.

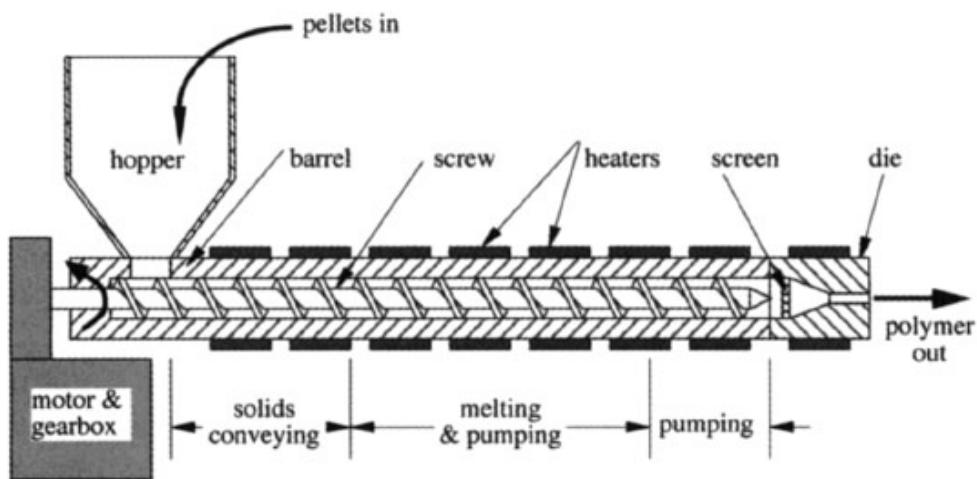


Figura 1 Diagrama de un extrusor. Fuente: [6].

2.1.2 Componentes de un extrusor

En un extrusor monohusillo se pueden identificar los siguientes componentes:

- El husillo o tornillo (*screw*)
- El barril (*barrel*)
- La tolva y apertura de alimentación (*hopper, feed throat*)
- Sistemas de calentamiento y enfriamiento (*heaters, coolers*)
- La boquilla (*die*)
- El sistema motor (*drive*)
- Sistemas de instrumentación y control

2.1.2.1 El husillo

El husillo o tornillo es el elemento principal del extrusor. Su desplazamiento relativo respecto al barril (el tubo que lo envuelve) es el causante del movimiento del material a través del extrusor y de la acumulación de presión en el cabezal. Otras funciones que cumple son las de calentar el material (por fricción) y mezclarlo.

La geometría del husillo es la de un tornillo: es un cilindro metálico rodeado exteriormente por un filete helicoidal, como se puede mostrar en los ejemplos mostrados en la Figura 2.



Figura 2 Diferentes husillos de extrusión. Fuente: <http://www.screwbarrels.co.in/screw-barrel-for-extruder.htm>.

2.1.2.2 El barril

El barril o cilindro es un tubo metálico que envuelve el husillo. Debe ajustarse bien al tornillo y tener una buena resistencia al desgaste.

Junto con el tornillo, el barril forma parte del mecanismo de transporte del extrusor (véase Modelo de placa plana) y también transmite el calor desde los calentadores al material.

2.1.2.3 La tolva y apertura de alimentación

La alimentación del extrusor se realiza con la llamada granza o pellets, es decir, el material plástico en forma de un granulado, que se muestra en la Figura 3.

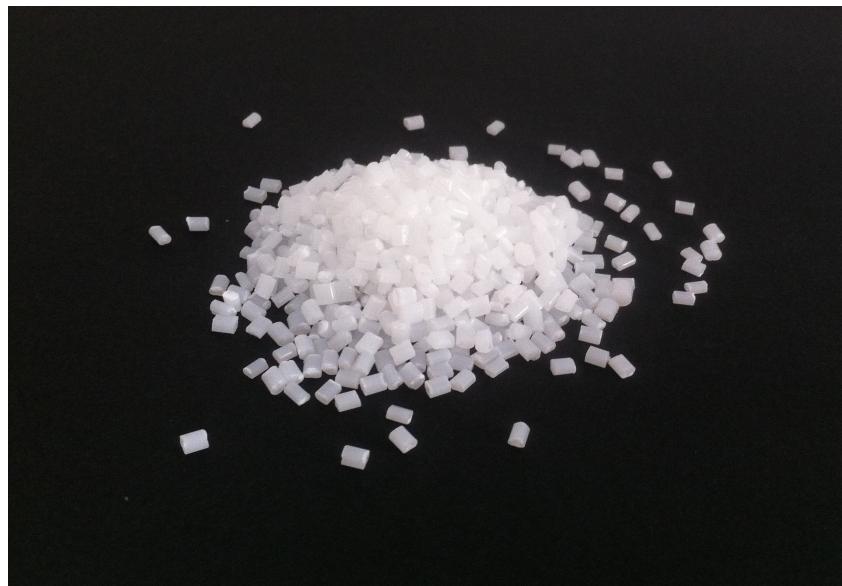


Figura 3 Granza de ABS.

La tolva y la apertura deben diseñarse para asegurar la alimentación continua de granza al extrusor, sin atascos. Se suele aislar térmicamente del resto del extrusor o refrigerar, para mantener el material en estado sólido.

2.1.2.4 Sistemas de calentamiento y enfriamiento

Los extrusores comerciales presentan generalmente 3 o más bandas de calentamiento, que constan de un elemento calefactor, un elemento refrigerador (en la mayoría de los casos por aire) y uno o más sensores de temperatura. El elemento refrigerador permite controlar de manera más precisa la temperatura de la banda, y en los casos en los que el tornillo aporta todo el calor a la mezcla, evacuar el calor sobrante.

En un proceso de extrusión convencional, el sistema motor proporciona la mayor parte de la energía necesaria para fundir el material (70 a 80%) a través de la fricción con el husillo, mientras que el sistema de calentamiento representa la parte más pequeña (el restante 20, 30%) [4, p. 75]. Este hecho no ocurre en los extrusores de filamento analizados (sección 2.6), donde son los calentadores los que aportan la mayor parte de la energía.

2.1.2.5 La boquilla

La boquilla es el componente que se coloca en el extremo final del extrusor con el objeto de dar forma al producto extruido.

El polímero fundido atraviesa el orificio o conducto de la boquilla impulsado por la presión que se forma justo antes del cabezal. El final de este canal tiene la sección que se pretende dar al material extruido: circular para hacer filamento, rectangular para formar planchas, etc.

2.1.2.6 El sistema motor

El sistema motor de un extrusor se encarga de impulsar el husillo en un movimiento de rotación. El motor eléctrico es el más empleado en extrusión, por su facilidad de control. Además de un motor, el sistema completo comprende otros elementos como rodamientos, reductoras, etc. para transmitir la potencia al husillo.

Para producir un extruido de dimensiones estables, el husillo debe girar a una velocidad constante, por lo que tanto el sistema motor como su sistema de control deben diseñarse teniendo en cuenta este factor.

2.1.2.7 Sistemas de instrumentación y control

El control de la extrusión requiere de una serie de sensores colocados en la máquina extrusora que controlen las variables del proceso. Los tres sensores más importantes son:

- **Sensores de temperatura en el barril**, generalmente termopares que se acoplan en agujeros mecanizados en el mismo, para estar más cerca del fluido.
- **Sensor de presión en el cabezal**, ya que ésta es una de las variables más importantes para la calidad del producto.
- **Tacómetro** para conocer la velocidad del husillo.

Estos sensores fundamentales, junto con otros de menor importancia, alimentan de datos un sistema de control que se encarga de ajustar los actuadores de acuerdo a los algoritmos de control implementados.

2.1.3 Zonas funcionales de un extrusor

El polímero pasa por tres etapas en el seno de un extrusor, desde el punto de alimentación en forma de pellets, hasta la transformación en un producto extruido. Estas tres fases son:

- **Transporte de sólidos.** El transporte del material granulado hasta las zonas de fundido del extrusor se realiza mediante dos mecanismos:
 - Por **gravedad**, como ocurre en la tolva.
 - Por **fricción**, como ocurre en la zona de alimentación del tornillo, donde el roce del material con el tornillo y las pared interior del barril impulsa la granza hacia la zona de fusión.
- **Plastificación.** La plastificación es la etapa de extrusión en la que el material está parcialmente fundido, donde conviven la fase sólida y fluida.
- **Transporte de material fundido.** Es la zona en la que el polímero está completamente fundido, y es impulsado por el mecanismo de transporte del polímero (véase Modelo de placa plana) hacia la boquilla.

2.1.4 La línea de extrusión

La fabricación de productos extruidos requiere de más maquinaria aparte del propio extrusor; esta maquinaria maneja el producto en las etapas posteriores a la extrusión y se organiza en forma de línea de producción.

Algunos de los elementos que pueden formar parte de una línea de extrusión son:

- **Sistema de manejo del polímero** (*resin handling and drying*). Se encarga de secar el producto (las resinas suelen ser higroscópicas) mezclar los aditivos y alimentar la tolva del extrusor.
- **Sistema de refrigeración** (*cooling*). Enfría el producto extruido al abandonar el extrusor. Se emplea aire o agua.
- **Sistema de medida** (*measurement system*). Por ejemplo, sensores láser para tomar medidas de un perfil y comprobar si las dimensiones son correctas.
- **Sistema de extracción** (*puller* o *haul-off*). Extrae el producto del extrusor a un ritmo constante.
- **Sistema de corte** (*cutter*). Si la aplicación lo requiere, por ejemplo la producción de tuberías de cierta medida, un sistema de corte puede dividir el producto extruido en segmentos discretos.
- **Sistema de bobinado** (*winder*). Si el producto se comercializa en forma de bobinas, al final de la línea una máquina se encarga de enrollar el producto en carretes.

A continuación se muestra un diagrama de una línea de extrusión de tubos (Figura 4), que contiene elementos comunes con la línea de extrusión de filamento que se pretende crear en este proyecto.

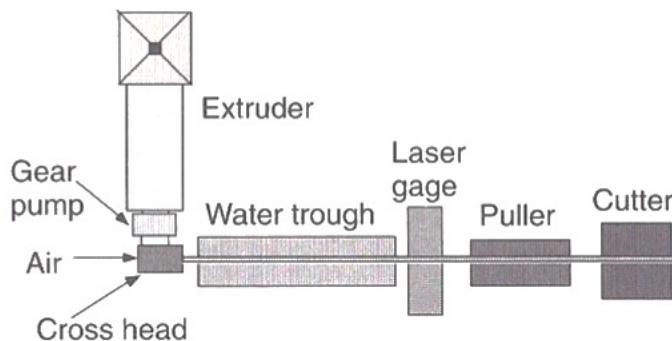


Figura 4 Línea de extrusión de tubos, formada por extrusor (extruder), tanque de refrigeración (water trough), medidor láser (laser gage), sistema de extracción (puller) y cortador (cutter). Fuente: [3, p. 36].

2.2 El husillo

El husillo es la pieza más importante del extrusor y sobre la que se diseña el resto de la máquina. Por esta razón, en este apartado se introducen algunos conceptos relacionados con este componente.

El husillo de un extrusor es un cilindro metálico rodeado por uno o varios filetes helicoidales. La función de estos filetes es la de crear un canal, “enrollado” a lo largo de la longitud del tornillo, por el que el polímero fundido fluye hacia la boquilla del extrusor.

El mecanismo que impulsa el material fluido por el canal se basa en el movimiento relativo del canal (husillo) y del “techo” del canal (la superficie interior del barril). El polímero avanza debido al arrastre viscoso de las superficies móviles (flujo de Couette).

Se han desarrollado varios modelos cuantitativos que permiten entender el proceso de transporte del material fluido, en este documento se presenta un modelo simplificado, el modelo de placa plana (véase página 27).

2.2.1 Parámetros del husillo

Se definen una serie de dimensiones que determinan la geometría del husillo. Los dos parámetros más importantes de un tornillo de extrusión son el diámetro y la longitud:

- El **diámetro del husillo (D)** es la medida fundamental del extrusor. Debido a que la mayoría de las dimensiones se definen en relación al diámetro, esta medida determina el tamaño final del extrusor. El otro efecto fundamental de esta variable es sobre la capacidad de la máquina: aumentar el diámetro del extrusor incrementa notablemente el caudal de salida (véase 2.4.1).
- La **longitud del husillo (L)** se expresa en función del diámetro del extrusor, por medio del **ratio L/D** . La elección de un ratio L/D más elevado afecta al tamaño del extrusor, mejora la capacidad de mezclado y fundido del polímero y disminuye la sensibilidad del extruido a la presión de la boquilla [7].

Se debe hacer notar que se considera el diámetro externo del tornillo (de filete a filete) y la longitud fileteada del husillo, como se indica en la Figura 5.

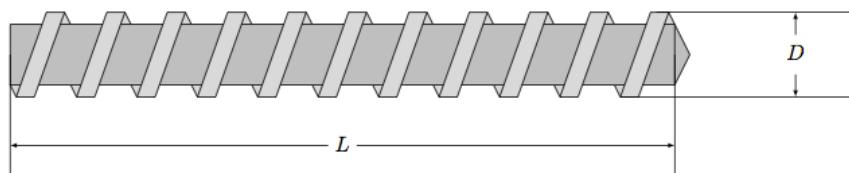


Figura 5 Diagrama del diámetro y longitud de un husillo de extrusión.

El resto de dimensiones del husillo se pueden ver en la Figura 6; después de ella se incluye una lista con los símbolos de las variables que se han empleado en este documento para referirse a estas dimensiones.

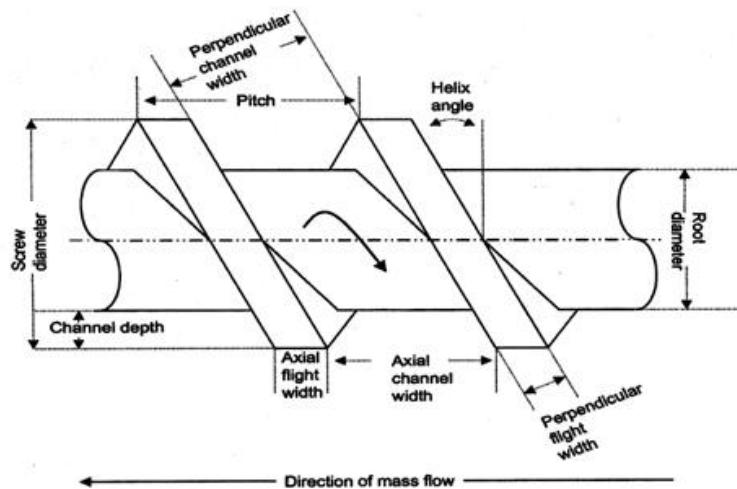


Figura 6 Dimensiones de un husillo. Fuente:
<http://www.slscrewbarrel.com/UploadFile/201063191736307.jpg>.

- Diámetro del husillo (*screw diameter*), D.
- Ángulo del filete (*helix angle*), φ .
- Anchura perpendicular del canal (*perpendicular channel width*), W.
- Profundidad del canal (*channel depth*), H.

2.2.2 El husillo estándar

El husillo estándar [4, p. 388] es una geometría de husillo empleada comúnmente en extrusión. Se trata de un diseño desarrollado empíricamente durante las últimas décadas y que se adapta bien al procesamiento de una amplia gama de polímeros; la mayoría de extrusores en uso tienen un tornillo cuyas dimensiones están dentro del rango del llamado husillo estándar.

Las dimensiones se expresan como múltiplos del diámetro, D , y son las siguientes:

- Longitud total: 20D-30D
- Longitud de la sección de alimentación: 4D-8D
- Longitud de la sección de bombeo: 6D-10D
- Número de filetes: 1
- Ángulo del filete: 17.66°
- Ancho del filete: 0.1D
- Profundidad del canal en la sección de alimentación: 0.15D-0.15D

2.3 Polímeros

Los polímeros son materiales compuestos de cadenas de unidades repetidas llamadas monómeros. Los polímeros son una de las familias de materiales más usados en nuestra sociedad: gomas, siliconas, neopreno, “plásticos”, etc.

Los llamados plásticos son materiales poliméricos que se pueden procesar por moldeo. Una clasificación tradicional los divide en termoestables, termoplásticos y elastómeros. La tecnología de extrusión se suele aplicar a materiales termoplásticos, que pueden ser

calentados y moldeados una y otra vez sin cambiar químicamente su estructura (aunque pueden sufrir degradación).

Dentro de los productos de extrusión, el filamento para impresión 3D no puede ser otro material que un termoplástico, ya que pasa por un primer proceso de transformación en el extrusor que lo fabrica y un segundo calentamiento en el cabezal de la impresora 3D.

En impresión 3D mediante la tecnología FDM se comercializan muchos polímeros en forma de filamento: ABS, PLA, Nylon, PETT, PE, PETG...[8]–[10]. De ellos los que primero fueron empleados son el ABS y el PLA, que continúan siendo los más populares en la actualidad.

Tabla 1 Propiedades de polímeros empleados en extrusión. Fuente: [11].

Material	Power Law Index, n	Melting Point, T _m (°C)	Glass Transition T _g (°C)	Density g/cc	Thermal Conductivity, k (J/msC)	Specific Heat, cp (kJ/kgC)
PS	0.3	—	101	1.06	0.12	1.20
PVC	0.3	—	80	1.40	0.21	1.10
PMMA	0.25	—	105	1.18	0.2	1.45
SAN	0.3	—	115	1.08	0.12	1.40
ABS	0.25	—	115	1.02	0.25	1.40
PC	0.7	—	150	1.20	0.19	1.40
LDPE	0.35	120	-120	0.92	0.24	2.30
LLDPE	0.6	125	-120	0.92	0.24	2.30
HDPE	0.5	130	-120	0.95	0.25	2.25
PP	0.35	175	-10	0.91	0.15	2.10
PA-6	0.7	225	50	1.13	0.25	2.15
PA-6,6	0.75	265	55	1.14	0.24	2.15
PET	0.6	275	70	1.35	0.29	1.55
PBT	0.6	250	45	1.35	0.21	1.25
PVF	0.38	275	-40	1.76	0.16	1.38
PA-6,6	0.6	275	70	2.15	0.2	1.18

2.3.1 Propiedades de los polímeros

A continuación se detallan algunas de las propiedades de los polímeros que son relevantes en el proceso de extrusión.

2.3.1.1 Viscosidad

La viscosidad se define informalmente como la resistencia a fluir de un material. Más estrictamente, la viscosidad (η) es la relación entre el esfuerzo cortante (τ) y el gradiente de velocidad del fluido ($\dot{\gamma}$):

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Los polímeros fundidos son materiales de alta viscosidad, que se resisten a fluir, como resultado de estar compuestos por largas moléculas entrelazadas. Esta alta viscosidad es la que permite que sean procesados por extrusión.

Un fluido se conoce como newtoniano si su viscosidad es independiente del gradiente de velocidad (tasa de cizallamiento, *shear rate*) que se le aplique. Los plásticos, sin embargo, no son fluidos newtonianos, sino que tienen un comportamiento llamado pseudoplástico. En este comportamiento, la viscosidad disminuye cuando aumenta el gradiente de velocidad al que es sometido el fluido. Un polímero que se está procesando, y por ello sometido a un esfuerzo cortante, disminuirá su viscosidad si aumenta la velocidad de procesamiento.

Otro de los elementos de los que depende la viscosidad de un polímero es de la temperatura. A mayor temperatura, la viscosidad del polímero disminuye.

2.3.1.2 Melt Flow Index (MFI)

El Melt Flow Index (MFI) es un índice que indica de la facilidad para fluir de un polímero. Para determinarlo se emplea un procedimiento normalizado descrito en la norma ISO 1133-1 [12]. Según este procedimiento una muestra del polímero se calienta y, sometida a la presión ejercida por un peso determinado, se hace fluir a través de un orificio. En el resultado del test se expresa la masa de polímero que ha fluido por el orificio, en gramos/10 minutos, que es la duración de la prueba.

En impresión 3D se emplean polímeros con alta fluidez para que puedan ser procesados por el extrusor de una impresora 3D (la pieza que funde y deposita el plástico para dar forma al objeto diseñado, con cabezales que usualmente están entre los 0.1 a 0.5mm de diámetro).

La industria comercializa estas resinas con la denominación de materiales para inyección plástica, a diferencia de las resinas para extrusión, que tienen menores requerimientos de fluidez. Otro indicador de una resina de alta fluidez es que se emplee en la inyección de piezas de paredes finas.

Después de recopilar las hojas de características de algunas de las referencias de ABS que se emplean para la fabricación de filamento para impresión 3D, se ha concluido que un rango aceptable para el ABS de impresión 3D está comprendido entre 13 g/10min (obsérvese que la densidad del polímero es alrededor de 1g/ml [Tabla 1]) y 42 g/10min de Melt Flow Index, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Tabla de Melt Flow Index (MFI) de referencias de ABS usadas en impresión 3D, resultados según ISO 1133 a 220°/10kg. Fuentes: [13], [14].

Referencia	MFI
POLYLAC PA-747	13 ml/10min
CYCLOLAC MG94	42g/10min

2.3.1.3 Temperatura de fusión y transición vítrea

El ABS es un plástico amorfó, lo que quiere decir que sus cadenas no forman estructuras cristalinas (en contraposición a otros plásticos, llamados semicristalinos, como el polipropileno o el nylon).

En los polímeros se define la temperatura de fusión como la temperatura a la que funden completamente los cristales. Por ello, no es posible definir propiamente una temperatura de fusión para un plástico amorfó como el ABS. En este caso se emplea la llamada temperatura de transición vítrea, T_g .

La temperatura de transición vítrea es aquella a partir de la cual el polímero empieza a aumentar su plasticidad: disminuye su dureza, densidad y rigidez. Conforme se eleva la temperatura de un plástico por encima de su temperatura de transición vítrea aumenta gradualmente su fluidez. No ocurre un cambio drástico de estado como en otros materiales, por ejemplo, en la transición de agua a hielo.

En el caso del ABS la temperatura de transición vítrea es de 105-109°C [15], y las temperaturas en las que su fluidez lo hace adecuado para su extrusión, un rango denominado temperatura de procesamiento, se sitúa en los 177-232°C [15].

2.4 Modelos cuantitativos del extrusor

En esta sección se presentan 3 modelos de funcionamiento de un extrusor, en orden creciente de sofisticación. El objetivo es ofrecer una visión cuantitativa del mecanismo de extrusión (centrado en el transporte de material fundido), para permitir al lector entender el papel de cada una de las variables. Sin embargo, las simplificaciones realizadas en la concepción de estos modelos hacen que los resultados numéricos derivados de su aplicación deban ser considerados como meras estimaciones.

2.4.1 Análisis dimensional de un extrusor

En la referencia [16] (lecciones 23-26, *Flows in polymer processing*), se hace un análisis dimensional del caudal de un extrusor. Identificando las variables relevantes que influyen en el caudal (flujo volumétrico que abandona el extrusor, \dot{V}) y mediante algunas simplificaciones que se exponen en el documento, se puede llegar la conclusión de que:

$$\dot{V} \sim N D^3$$

donde:

- \dot{V} es el flujo volumétrico

- N es la velocidad de rotación del husillo
- D es el diámetro del husillo

Esta relación nos permite hacer una primera aproximación al caudal del extrusor. Éste es proporcional a la velocidad del husillo y al cubo de las dimensiones del extrusor (representadas por el diámetro).

Es decir, aparte del tamaño del extrusor (a las que el caudal es muy sensible), lo que determina el flujo volumétrico del extrusor es la velocidad del husillo. De las variables que se controlan en el proceso, la que juega un papel más importante es ésta. Una de las conclusiones que se puede extraer de este resultado es que, para obtener un producto consistente en términos de calidad, es necesario mantener la velocidad constante.

2.4.2 Modelo de placa plana

El modelo de placa plana es un modelo cuantitativo que permite explicar el movimiento del fluido por los canales de un husillo encerrado en un tubo [4, pp. 277–283].

Se trata de un modelo que, por las hipótesis que emplea, permite obtener una solución analítica sencilla del problema. Por esta sencillez, es un modelo ampliamente utilizado como una primera aproximación analítica, ya que permite entender el papel que juega cada una de las variables. Sin embargo, debido a la gran cantidad de hipótesis asumidas, sus resultados contienen un error significativo y deben ser empleados con cautela.

2.4.2.1 Hipótesis del modelo

Las hipótesis consideradas en el modelo estudiado son:

- El fluido es newtoniano; su viscosidad es independiente del gradiente de velocidades, responde a la ecuación: $\tau_{xy} = \mu \frac{dv_x}{dy}$, donde τ_{xy} es la tensión tangencial del fluido, $\frac{dv_x}{dy}$ es el gradiente de velocidad y μ es la viscosidad del fluido.
- La viscosidad del fluido es independiente de la temperatura.
- Estado estacionario.
- Se aplica la condición de no deslizamiento en las paredes sólidas.
- Se desprecian las fuerzas volumétricas y de inercia.
- El ancho del canal se considera infinito para despreciar el efecto de los flancos del husillo.
- Se desprecia la curvatura del canal, con lo que la geometría del problema queda reducida a un canal plano cubierto por una placa plana.

2.4.2.2 Geometría del problema

La geometría del problema queda reducida a la representada en la Figura 7 al aplicar las simplificaciones consideradas. Se trata de una geometría cartesiana en el que el sistema de referencia se sitúa sobre el tornillo (siendo el barril, representado por una placa plana, el que se desplaza sobre el canal).

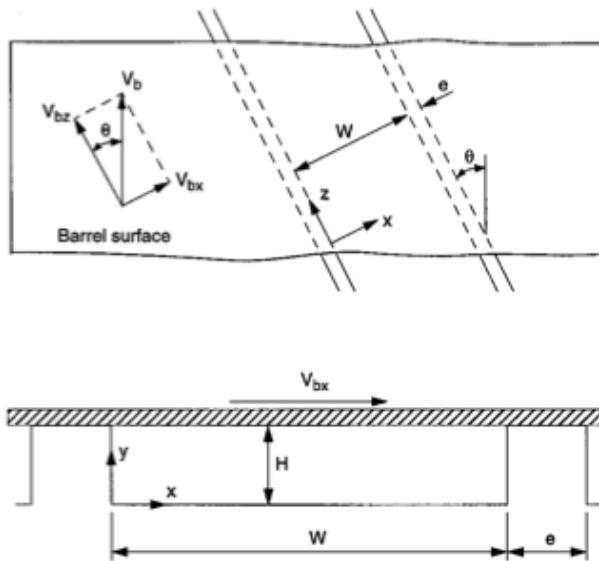


Figura 7 Geometría y sistema de referencia del modelo de placa plana (Fuente: [17]).

Con la geometría establecida el problema se puede reducir al enunciado:

Una placa plana se mueve con una velocidad v_b sobre un canal rectangular con ángulo φ entre v_b y los flancos del canal.

El objetivo es determinar el perfil de velocidades en la dirección del canal (eje z) y la expresión del caudal volumétrico.

2.4.2.3 Solución del modelo

La ecuación de cantidad de movimiento de un fluido (despreciando fuerzas volumétricas y de inercia) [4, p. 132] en el eje z es la siguiente:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}$$

donde solo existe el esfuerzo τ_{zy} y el resto de los términos son nulos. La ecuación queda:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y}$$

donde $\frac{\partial P}{\partial z}$ es el gradiente de presión en la dirección z, que se representa con el símbolo g_z .

Se resuelve la ecuación de variables separadas para τ_{zy} , quedando la ecuación lineal

$$\tau_{zy} = \tau_0 + g_z y$$

Para un fluido newtoniano, $\tau_{zy} = \mu \frac{dv_z}{dy}$, y la ecuación queda

$$\mu \frac{dv_z}{dy} = \tau_0 + g_z y$$

Esta ecuación diferencial puede resolverse aplicándole las siguientes condiciones de contorno derivadas de la condición de no deslizamiento:

- $v_z(y = 0) = 0$
- $v_z(y = H) = v_{bz}$

Donde v_{bz} es la velocidad del la placa en la dirección z y H es la profundidad del canal (ambas representadas en la Figura 7).

La solución es el campo de velocidades en el eje z a lo largo de la coordenada y :

$$v_z(y) = \left(\frac{v_{bz}}{H} - \frac{g_z H}{2\mu} \right) y + \frac{g_z}{2\mu} y^2$$

Este perfil de velocidades tiene un componente lineal de flujo viscoso y un componente parabólico de flujo de presión. Si se considera $g_z > 0$, como ocurre en la operación normal de un extrusor, sus efectos se superponen con signos contrarios, como se muestra en la Figura 8.

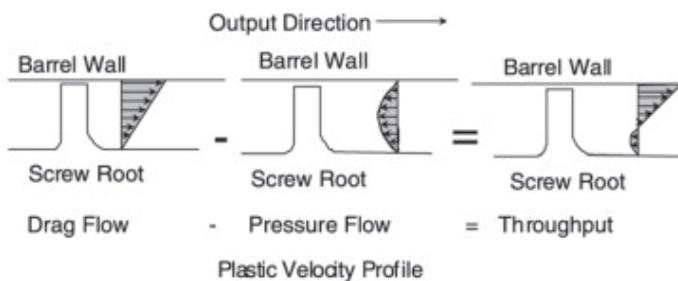


Figura 8 Componentes del perfil de velocidades en z : flujo viscoso y de presión (fuente: [7])

Integrando el campo de velocidades en la superficie de la sección del canal obtenemos el flujo volumétrico de material que circula por él:

$$\dot{V} = \frac{1}{2} WH v_{bz} - \frac{WH^3 g_z}{12\mu}$$

La velocidad de la placa depende de la velocidad de giro del husillo, y cuando se proyecta su componente sobre eje z la expresión anterior queda:

$$\dot{V} = \frac{1}{2} WH \pi D N \cos \varphi - \frac{WH^3 g_z}{12\mu}$$

2.4.2.4 Interpretación de la solución

La interpretación de la solución para el flujo volumétrico del modelo de placa plana permite obtener una buena visión de las variables que más influyen en el caudal de salida de un extrusor. Para ello se distinguen dos términos:

- El flujo viscoso (*drag flow*), \dot{V}_D , que responde a la ecuación

$$\dot{V}_D = \frac{1}{2} WH\pi DN \cos \varphi$$

Se puede observar cómo el flujo viscoso solo depende de la geometría del extrusor (W, H, D, φ) y de la velocidad de giro del husillo (N). Este término siempre es positivo, y se trata del mecanismo por el que el tornillo hace llegar el material a la boquilla del extrusor, avanzando por el canal del husillo. Nótese también como en este término, la producción del extrusor es directamente proporcional a la velocidad del husillo.

- El flujo de presión (*pressure flow*), \dot{V}_P , que responde a la ecuación

$$\dot{V}_P = \frac{WH^3 g_z}{12\mu}$$

En la mayoría de los procesos de extrusión el gradiente de presiones g_z es positivo (la presión aumenta al avanzar el plástico por el extrusor), por lo que este término, que aparece con signo negativo en la expresión del caudal, disminuye el flujo volumétrico total que alcanza la boquilla.

La comprensión de estos términos arroja luz sobre los dos principales mecanismos por los que el plástico avanza a través del extrusor. El movimiento relativo de tornillo y barril impulsa el plástico mediante un flujo de Couette (viscoso), mientras que, por la presión que se acumula en la boquilla, una parte del fluido retrocede por un flujo de Hagen–Poiseuille (presión).

Para que en un extrusor el flujo neto sea positivo, el flujo viscoso debe ser mayor que el de presión. En un sistema real bien diseñado, además, el término viscoso es mucho mayor que el de presión, con el objetivo de maximizar la producción del extrusor y de disminuir la sensibilidad del sistema a las variaciones de presión (que, a diferencia de la velocidad del husillo, no puede ser controlada).

2.4.3 Modelo de la característica del extrusor y la boquilla

El modelo de la característica del extrusor y la boquilla permite obtener una estimación del caudal máxico del extrusor por medio de la estimación del valor de la presión en la boquilla [6]. Se definen dos ecuaciones características del problema, la característica del extrusor y la característica de la boquilla.

2.4.3.1 Característica del extrusor

La característica del extrusor es la ecuación del flujo volumétrico derivada del modelo de placa plana (donde $g_z = P/L_{canal} = P \sin \varphi / L$):

$$\dot{V} = \frac{1}{2} WH\pi DN \cos \varphi - \frac{WH^3 \sin \varphi P}{12\mu} \frac{P}{L}$$

Agrupando los términos constantes de la expresión obtenemos

$$\dot{V} = \alpha N - \beta P$$

donde

$$\alpha = \frac{1}{2} W H \pi D \cos \varphi$$

$$\beta = \frac{W H^3}{12 \mu L}$$

2.4.3.2 Característica de la boquilla

Se considera el caso de un fluido newtoniano fluyendo a través de un conducto cilíndrico, la caída de presión es:

$$\dot{V} = \frac{\pi R_d^4 P}{8 L_d \mu}$$

donde R_d y L_d son el radio y longitud, respectivamente, de la boquilla (*die*).

Este modelo de la boquilla contiene simplificaciones, como la suposición de que el fluido es newtoniano (lo que no es real) y que toda la caída de presión ocurre en el canal de la boquilla, cuando una caída de presión comparable se puede producir entre el final del husillo y el comienzo del canal.

2.4.3.3 Punto de operación

El punto de operación es el punto de equilibrio en el que el caudal volumétrico es el mismo para las dos características; la presión a la que se equilibrان las dos ecuaciones. Se representan las dos curvas (para una velocidad N determinada) en una gráfica, como se observa en la Figura 9.

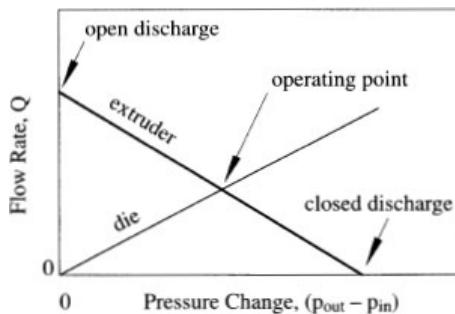


Figura 9 Características del extrusor y la boquilla. Fuente: [6].

La característica del extrusor nos muestra que el caudal máximo se logra si no existe boquilla que restrinja el flujo (sin caída de presión, no hay flujo a contracorriente). El punto de mayor presión es aquel en el que el caudal nulo: la boquilla no deja pasar nada de material.

El punto de operación del extrusor es en el que las dos curvas se intersecan; aquél en la que la caída de presión causada por el cabezal equilibra el flujo por el extrusor y a través de la boquilla.

Como se aprecia, este modelo de un extrusor es muy simple y sólo permite obtener estimación del caudal másico y presión en el cabezal, sin embargo es muy útil para calcular las primeras cifras tentativas y desarrollar la visión de cómo funciona un extrusor.

2.5 Calidad del filamento

La calidad del producto extruido puede resultar difícil de determinar mediante parámetros cuantitativos o no subjetivos, y por ello en este proyecto se han definido los siguientes aspectos que serán considerados para determinar la calidad del filamento extruido:

- La **tolerancia dimensional**, definida como el error que presenta el filamento frente a un diámetro nominal o medio.
- La **ausencia de defectos detectables visualmente**, como burbujas, quemaduras, etc.
- La **capacidad del filamento para ser empleado por una impresora 3D**. En este caso, ya que la calidad de la pieza se determina subjetivamente y puede estar influenciada por multitud de factores externos (calibración de la máquina, rigidez de la misma, velocidad de impresión...), se valorará principalmente que se pueda imprimir sin causar problemas en el transcurso del proceso, y se podrán aportar opiniones subjetivas sobre el proceso y el resultado.

Otros factores que pueden determinar la calidad del filamento pero que no han sido considerados en este proyecto son: propiedades mecánicas del material, de las piezas impresas, circularidad de las secciones del filamento...

2.5.1 Factores que influyen en la calidad del filamento

En esta sección se discutirá cualitativamente qué factores afectan a la calidad del filamento, tanto a las propiedades del material como a su estabilidad dimensional.

2.5.1.1 Calidad del material

Los parámetros de calidad del filamento referentes a la calidad del material, como las propiedades mecánicas, las burbujas y quemaduras, dependen del estado inicial de la grana y del procesado del plástico dentro del extrusor.

El material inicial debe almacenarse en un lugar seco y consumirse en un plazo razonable, ya que el ABS es un material higroscópico que absorbe la humedad del ambiente. En caso contrario el agua contenida en la resina da lugar a burbujas de vapor en el extruido.

Para evitar los defectos ocasionados en el proceso de transformación, el plástico no debe sobrepasar una temperatura máxima y debe permanecer el menor tiempo posible en el extrusor. Sometido a altas temperaturas el polímero se degrada térmicamente, perdiendo propiedades mecánicas, y en casos graves el resultado es visible: el material se oscurece formando “quemaduras”.

2.5.1.2 Calidad dimensional

La calidad dimensional del material consiste en la producción de un extruido cuyas dimensiones estén dentro de los niveles de tolerancia definidos para el producto.

Un fenómeno determinante para la calidad de perfiles extruidos es el ensanchamiento que experimenta el material al abandonar la boquilla (*die swell*). En la producción de perfiles este fenómeno debe ser considerado en el diseño de la boquilla. En este caso, al tratarse de un filamento con sección circular, el ensanchamiento ocurre en todas direcciones y no altera la forma del producto. Tampoco se considera el tamaño de la boquilla ya que el diámetro del filamento se determina con la velocidad del *puller* en vez de directamente con el diámetro de la boquilla.

Las dimensiones constantes del filamento extruido dependen de la estabilidad de dos variables del problema. La primera es la cantidad de material que sale del extrusor. La segunda es la velocidad con la que el *puller* tira del filamento.

La cantidad de material que sale del extrusor, medida por ejemplo en kg/h o en g/s depende principalmente, como ya se ha discutido (véase sección 2.4.2.4) de la velocidad de rotación del husillo y de la presión en el cabezal. Además, es importante que las propiedades del material se mantengan constantes en el seno del extrusor, para ello la temperatura debe ser lo más estable posible.

La presión en el cabezal es una variable del proceso que no se puede controlar directamente; sin embargo la velocidad del giro del tornillo es fácil de regular y por las razones expuestas debe ser lo más constante posible. El motor debe además contar con suficiente par para afrontar los momentos puntuales en los que la resistencia del tornillo es mayor y mantener la velocidad inalterada. La temperatura del barril es también una variable que sobre las que se tiene control y por ello debe mantenerse también constante.

La velocidad del *puller* es el otro factor importante que se debe mantener estable para que el material abandone el cabezal a un ritmo constante. También debe asegurarse de que el plástico no deslice sobre la rueda del *puller* y de que no experimente vibraciones u oscilaciones.

2.5.2 Métricas de calidad dimensional

Se han definido una serie de parámetros cuantitativos que permiten valorar la estabilidad dimensional del filamento extruido.

Para determinar cada propiedad se toman n medidas del diámetro, D_i , a lo largo de una longitud de diámetro extruido. Se define:

- Diámetro nominal (D_N) como el diámetro estándar o normalizado del filamento. Los dos diámetros nominales más comunes en impresión 3D son 1.75 y 3 mm.
- Diámetro medio (D_M) como el promedio de todas las medidas:

$$D_M = \frac{\sum_1^n D_i}{n}$$

- Diámetro máximo (D_{MAX}) como el valor máximo de la serie:

$$D_{\text{MAX}} = \max_1^n \{D_i\}$$

- Diámetro mínimo (D_{MIN}) como el valor mínimo de la serie:

$$D_{\text{MIN}} = \min_1^n \{D_i\}$$

- Delta de diámetro (ΔD) como la diferencia entre el valor máximo y el mínimo:

$$\Delta D = D_{\text{MAX}} - D_{\text{MIN}}$$

A continuación se definen dos tolerancias, una expresada sobre el diámetro nominal del filamento y otra sobre el valor medio:

- La tolerancia sobre el diámetro nominal es la máxima desviación sobre el diámetro nominal:

$$\text{tolerancia sobre } D_N = \max \{ D_{\text{MAX}} - D_N; D_N - D_{\text{MIN}} \}$$

- La tolerancia sobre el diámetro medio es la máxima desviación sobre el diámetro medio:

$$\text{tolerancia sobre } D_M = \max \{ D_{\text{MAX}} - D_M; D_M - D_{\text{MIN}} \}$$

Así, se puede determinar la calidad del filamento sobre el diámetro nominal como $D_N \pm$ tolerancia sobre D_N ; o sobre el diámetro medio como $D_M \pm$ tolerancia sobre D_M .

De estos dos parámetros, el más relevante desde el punto de vista de la calidad de impresión es la tolerancia sobre el valor medio, ya que indica la consistencia del producto. El diámetro del filamento es un parámetro de impresión configurable, por lo que se puede adaptar la impresora a cualquier diámetro medio; la función de la tolerancia sobre el valor nominal es la de mantener la normalización del producto. Otro aspecto que debe ser considerado es que el límite superior del intervalo de tolerancia no sea tan elevado que pueda producir atascos en la impresora.

2.5.3 Procedimiento para medir el filamento

Para la evaluación de la calidad del filamento se detalló un procedimiento simple con el objeto que las medidas siempre se tomaran de la misma manera.

El mismo consiste en poner a funcionar el extrusor, y una vez que se hayan conseguido unas condiciones constantes, hacer marcas en el filamento extruido cada 30 segundos durante 4 minutos y medio (un total de 10 marcas). En cada uno de los puntos marcados se toma una medida del diámetro con un calibre. También se mide la masa de la muestra para calcular el caudal del extrusor. Un ejemplo de la hoja de toma de datos se muestra en la Figura 10.

Datos de la muestra

Modelo	Prototipo con unibody
Fecha	2014-08-19 15:59
Boquilla	4mm
Velocidad motor [rpm]	18
Velocidad puller [rpm]	85°
Temperatura	230°
Refrigeración	Sí, 2x24V

Notas
Prueba del puller con gomas y las guías

Procedimiento	Tomar 10 medidas del diámetro, una cada 30 segundos. Al final medir la longitud total extruida.
---------------	---

Toma de datos

Muestra	Diámetro [mm]
1	2.62
2	2.53
3	2.69
4	2.97
5	2.66
6	2.55
7	2.55
8	2.82
9	2.48
10	2.71

Defectos visuales
Aspecto OK
Superficie lisa y color uniforme

Masa total [g]	14
----------------	----

Figura 10 Hoja de toma de datos para determinar la calidad del filamento.

Para el cálculo automático de los parámetros definidos anteriormente, se ha desarrollado una hoja de cálculo que permite tomar datos y devuelve la información sobre la calidad del filamento. Un ejemplo del resultado del cálculo de estos parámetros se muestra en la Figura 11.

Resultados

Capacidad [kg/h]	0.19	
Diámetro medio [mm]	2.658	
Máximo [mm]	2.970	
Mínimo [mm]	2.480	
Delta diámetro [mm]	0.490	
Mitad de delta diámetro [mm]	0.245	
Tolerancia nominal [mm]	3.000	± 0.520
Tolerancia sobre valor medio [mm]	2.658	± 0.312

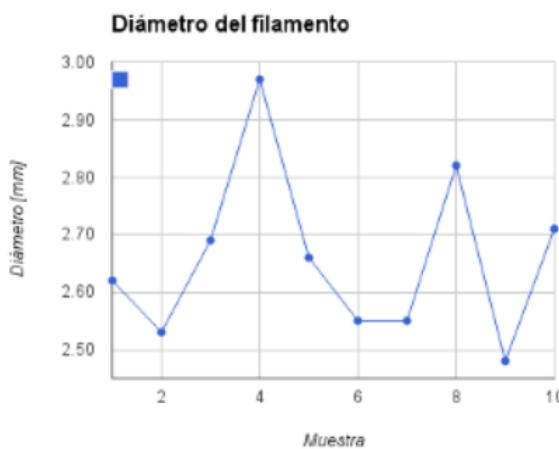


Figura 11 Ejemplo de parámetros de calculados para una muestra de filamento.

2.5.4 Calidad del filamento comercial

Con una finalidad orientativa, se pretende conocer qué tolerancia tiene el filamento comercial que se emplea en impresión 3D.

Para ello se ha tomado una bobina de filamento ABS comercial de 3mm, del fabricante Sun Ya Tech. De manera similar al procedimiento establecido para determinar la calidad del filamento producido en el proyecto, se han tomado 10 medidas de la muestra, espaciadas 0,5 metros.

Los resultados de la prueba se recogen en el anexo 6.5. La calidad nominal obtenida es de exactamente $3,00 \pm 0,10\text{mm}$, mientras que la tolerancia sobre el diámetro medio del filamento es $2,96 \pm 0,06\text{mm}$. Aquí se observa cómo el filamento comercial emplea un diámetro medio algo inferior a los 3mm, con el objeto de evitar el filamento que esté en el límite máximo del intervalo de tolerancia atasque la impresora.

Los resultados se corresponden con los que declara el fabricante en su página de producto [18], $2,90 \pm 0,10\text{mm}$ (más menos una décima de milímetro sobre un diámetro de 2.90mm).

2.6 Análisis de las soluciones existentes

El problema de construir un extrusor de filamento de baja capacidad, económico y bajo la filosofía open source ha sido ya planteado en otras ocasiones y se han propuesto soluciones documentadas en mayor o menor medida.

Dos de los diseños de extrusores merecen una mención individual por su importancia.

- El **Lyman Filament Extruder**, diseñado por Hugh Lyman y liberado por primera vez en Septiembre de 2012 [19]. Es uno de los primeros extrusores disponibles. Desde entonces el diseño ha evolucionado, dándose a conocer nuevas versiones con sustanciales mejoras. Los elementos que introdujo este extrusor, especialmente la broca del husillo y los tubos del barril, son ahora piezas comunes de la mayoría de los diseños sucesores. Es además el diseño mejor documentado de los que se han estudiado.
- El **Filastruder**, dado a conocer en Noviembre de 2012 por su autor, Tim Elmore, en un foro de internet [20]. Se trata presumiblemente del diseño de mayor éxito económico, ya que consiguió cerrar una campaña de *crowdfunding* en la que recaudó 212 278\$ para su proyecto. Además, el proceso completo de desarrollo del extrusor quedó reflejado en el foro, con lo que ahora es una fuente de información para otros usuarios interesados en extrusores open source.

Se han recopilado algunos datos significativos sobre las soluciones existentes, cuyos resultados se recogen en la Tabla 3. Se ha de tener en cuenta que los datos recogidos provienen de la propia documentación liberada por los autores y usuarios de los diseños, por lo que las fuentes pueden tener un carácter informal o los resultados pueden no estar convenientemente justificados.

Tabla 3 Comparación de extrusores de filamento. Fuentes: [20]–[26]

	Par de detenimiento del motor	Velocidad del motor	Tiempo para extruir 1kg	Diámetro del husillo	Longitud del husillo	Tolerancia declarada
Lyman v3 Extruder	2.942 N·m	13.5 rpm	8h	5/8" (15.875mm)	142 mm	±0.1mm
Filastruder	12 N·m	3 rpm	24h	5/8" (15.875mm)	-	±0.05mm
X3uder	22.56 N·m	2.5 rpm	10-12h	5/8" (15.875mm)	-	±0.05mm
ExtrusionBot	-	-	5-6h	-	-	±0.1mm
STRUDittle	-	-	8-16h	-	-	±0.05mm
FilaFab	-	-	5-6h	-	-	-

Las imágenes de cada uno de los modelos pueden consultarse en las imágenes de la Figura 12 hasta la Figura 17.

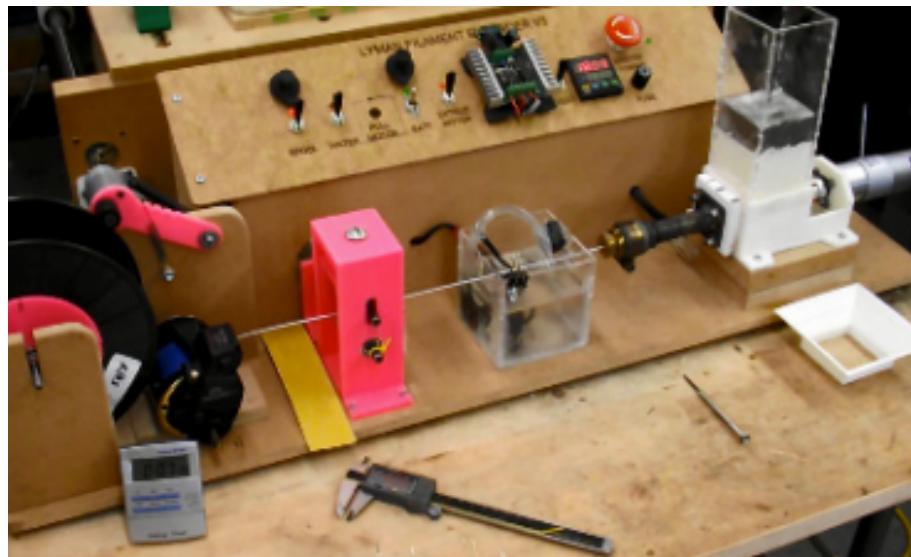


Figura 12 Lyman Filament Extruder versión 3, junto con tanque de refrigeración por agua, puller y winder.

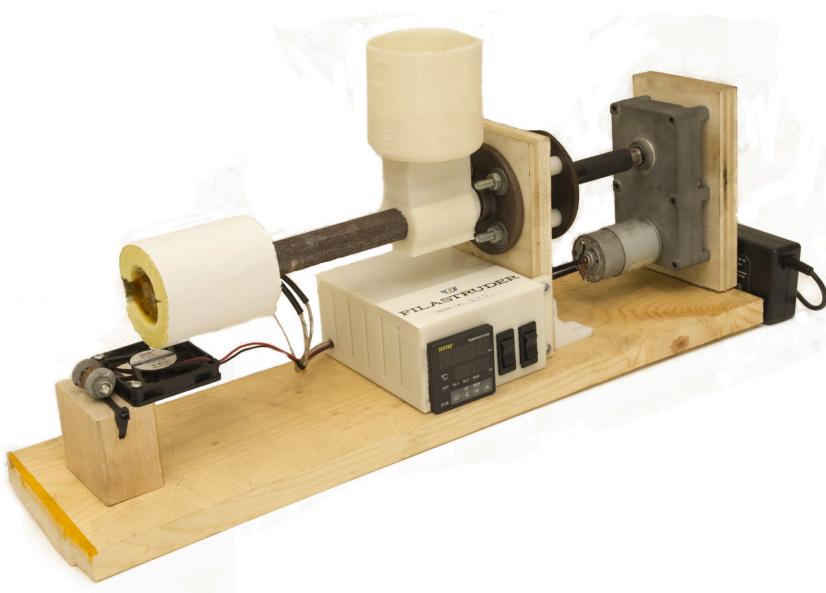


Figura 13 Filastruder



Figura 14 X3uder



Figura 15 ExtrusionBot



Figura 16 STRUdittle



Figura 17 FilaFab

2.7 Motivación y análisis económico del problema

La fabricación de filamento es una industria de nicho que está creciendo con el auge de las impresoras 3D. A pesar de que existen fabricantes por todo el mundo, incluido España, el mayor volumen de producción se concentra en China.

El filamento es un producto intercambiable entre las diferentes impresoras y proveedores: en general, la funcionalidad del filamento es la misma sea cual sea su fabricante. No existe apenas diferenciación entre los filamentos de ABS y PLA de los distintos distribuidores y fabricantes. Además, el proceso de extrusión es ampliamente empleado desde hace años. Es de esperar, por tanto, que el precio del filamento, con su creciente comoditización, se coloque en un punto cercano a su coste de producción.

Otra consideración sobre su precio es que, al tratarse de un producto voluminoso, el coste del transporte desde los lugares de producción puede ser comparable al precio del propio bien. Además, el estado inicial de este nicho de mercado, donde aún no existen muchos productores, favorece que el precio elevado del filamento.

La diferencia de precio entre la materia prima y el producto final registrada en este proyecto es considerable: la materia prima se adquirió por 4€/kg (incluyendo portes) y el filamento se comercializa por precios que comienzan en los 20€/kg.

El aspecto económico es pues, junto con el deseo de experimentar con el proceso, una de las motivaciones que llevan a los usuarios de impresoras 3D a construir su propio extrusor de filamento.

La popularización de la impresión 3D puede atraer a mayor número de competidores al mercado (incluyendo fabricantes locales), por lo que el precio para el consumidor del filamento puede bajar aún más hasta acercarse al coste de producción.

2.7.1 *Crowdfunding* de extrusores de filamento

Se puede obtener una justificación para el diseño de un extrusor de filamento económico y de dimensiones contenidas: ya existe una demanda real. Sin embargo, el nicho para este tipo de máquinas es muy reducido y especializado.

Además de los usuarios que han construido sus propias máquinas, se puede mostrar la demanda (modesta) de este producto mediante las campañas de *crowdfunding* que se han realizado.

El *crowdfunding* es un método de financiación para proyectos y empresas que distribuye el capital necesario entre una gran cantidad de participantes. Generalmente, cada uno de los contribuidores recibe a cambio de su apoyo una recompensa material, por ejemplo, una unidad del producto.

Una cantidad importante de los extrusores estudiados en el análisis previo fueron financiados mediante *crowdfunding*, los resultados que obtuvieron las campañas se resumen en la Tabla 4.

*Tabla 4 Campañas de crowdfunding de proyectos de extrusores. El precio unitario puede diferir de la recaudación unitaria al existir múltiples opciones de aportación económica al proyecto.**Fuentes: [22], [24]–[27].*

Extrusor	Total recaudado	Participantes en la campaña	Coste unitario
Filastruder	\$212 278	875	\$200
Strooder	£64 369	363	£229
ExtrusionBot	\$88 745	225	\$365
STRUdittle	\$18 350	69	\$300
FilaFab	£21 323	89	£220

3 Diseño, construcción y ensayo

En esta sección se presenta el proceso de diseño, construcción y evaluación del extrusor de filamento desarrollado. La estructura mediante la que se ha organizado refleja la sucesión de decisiones que han dado lugar al resultado final: desde la fijación de las variables de partida, pasando por un prototipo intermedio, hasta el modelo final. En último lugar, se analizan los costes y se evalúa la solución desarrollada.

3.1 Procedimiento

El problema a solucionar se caracteriza inicialmente por una gran incertidumbre: no se tiene un conocimiento preciso (obtenido mediante análisis o simulación) de las capacidades finales de la máquina, requiere la fijación de gran cantidad de variables iniciales, la aplicación de disciplinas muy distintas y el funcionamiento conjunto de diferentes subsistemas.

Por las razones expuestas se optó por la determinación de ciertas variables iniciales y la creación de un prototipo para poner a prueba el concepto. La transición desde la idea al prototipo, así como desde el prototipo al modelo final, se realiza mediante un planteamiento iterativo de sucesivas mejoras.

El desarrollo de una solución requiere de las siguientes etapas de diseño:

1. Estudio del problema, como queda reflejado en la sección de Análisis, y de las soluciones ya propuestas (Véase Análisis de las soluciones existentes).
2. Determinación de unos requerimientos mínimos para el proyecto, contenidos en la sección Objetivos del proyecto.
3. Diseño y simulación, mediante los conocimientos adquiridos en la etapa de análisis, del modelo inicial de extrusor.
4. Construcción y prueba de un prototipo funcional para poner a prueba el diseño.
5. Mejora del prototipo hasta dar lugar al modelo final.

3.1.1 Fases del desarrollo del extrusor

Se establecen una serie de fases del diseño del extrusor y unos plazos aproximados para su finalización, con el objeto de planificar el desarrollo del proyecto.

Las fases que se han considerado, junto con las tareas que las componen, son:

- Estudio del problema y dimensionamiento de los componentes principales.
 - Estudio teórico del problema
 - Cálculos previos y simulación
 - Dimensionamiento de los componentes principales
- Desarrollo del prototipo inicial
 - Aprovisionamiento de componentes
 - Desarrollo de los subsistemas del prototipo
 - Montaje y pruebas del prototipo

- Desarrollo del modelo final
 - Desarrollo de las mejoras sobre el prototipo
 - Pruebas finales
- Redacción de la memoria

Los plazos asignados a cada una de las fases se pueden observar en el diagrama de Gantt de la Figura 18.



Figura 18 Diagrama de Gantt de la programación del proyecto.

3.2 Herramientas empleadas

3.2.1 iPython

iPython es una herramienta para el lenguaje de programación Python que permite utilizar una interfaz de tipo *notebook* (cuaderno) [28].

Las interfaces tipo *notebook* son frecuentes en aplicaciones de computación científica para simular y comunicar ideas, ya que permiten una combinación de código, texto, fórmulas y gráficas en un mismo documento. Un ejemplo de cuaderno puede verse en la Figura 19.

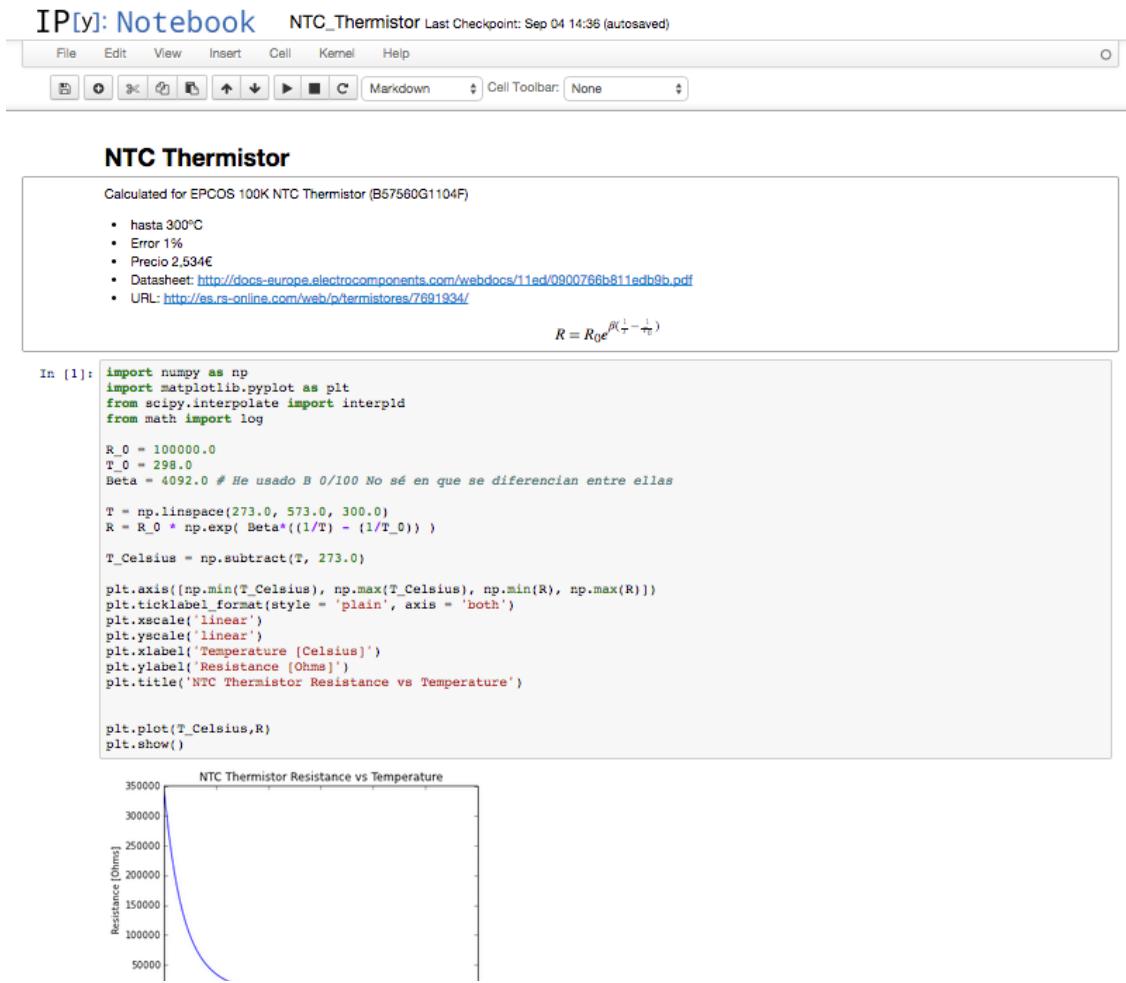


Figura 19 Captura de uno de los cuadernos de iPython de este proyecto.

En este proyecto se ha empleado iPython en dos ocasiones:

- Para la simulación inicial del extrusor, con el objetivo de entender la influencia cada una de las variables en el comportamiento del extrusor y obtener las primeras estimaciones (véase página 51). Este cuaderno es `Extruder_Notebook.ipynb`.
- Para la simulación del circuito del termistor. Se calculan las curvas de calibración del sensor y la tabla de verdad del sensor (véase páginas 80 - 80). Este cuaderno es `NTC_Thermistor.ipynb`.

Ambos cuadernos pueden consultarse, descargarse y ejecutarse en el repositorio online del proyecto [2].

3.2.2 FreeCAD

El software de diseño 3D empleado en este proyecto es FreeCAD, un programa de modelado 3D paramétrico, open source y gratuito [29]. El uso principal que se le ha dado es para producir los archivos de las piezas impresas. Una captura que muestra el software en funcionamiento se muestra en la Figura 20.

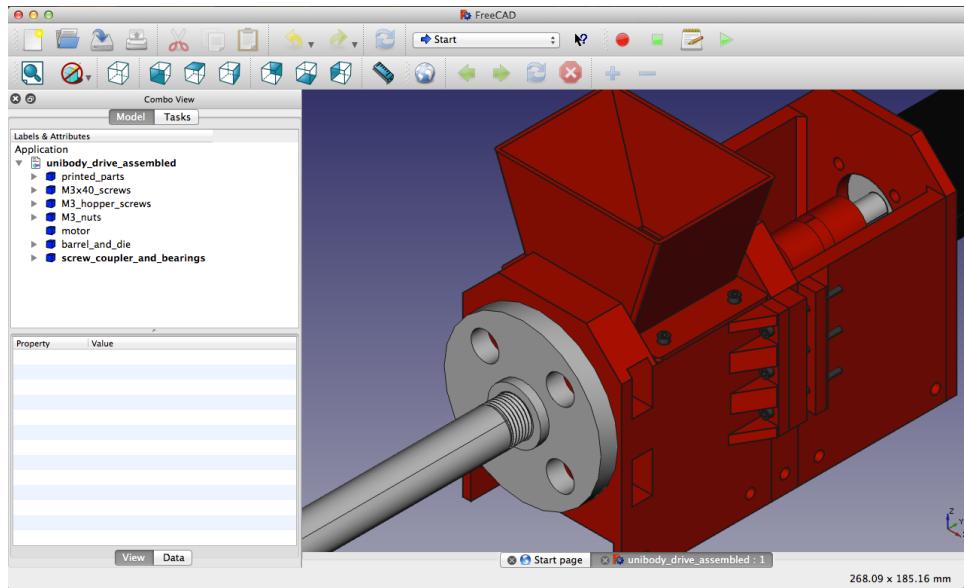


Figura 20 Captura de pantalla de FreeCAD.

La razón por la que se ha empleado FreeCAD es porque, al tratarse de software libre, gratis y multiplataforma, los archivos de este proyectos pueden ser modificados por cualquier usuario que no disponga de una solución CAD comercial. Por otra parte, al ser un producto en fase de desarrollo (se ha empleado la versión 0.14), su uso puede llevar aparejada la aparición de bugs y comportamientos inesperados.

Los bancos de trabajo de los que se ha hecho uso en este proyecto son:

- **Part**, para la creación de piezas a partir de geometrías primitivas, operaciones booleanas, etc.
- **Part design**, para la creación de piezas a partir de bocetos y características: extrusiones, vaciados, chaflanes, redondeados, etc.
- **Draft**, empleado para posicionar las piezas en el caso de los conjuntos.
- **Mesh**, empleado para generar mallas de las piezas (paso previo a la exportación a la extensión .stl, el formato usado en impresión 3D).

3.2.3 Github

Github es un repositorio Git (gestión de revisiones y código) online [30]. Es un servicio que permite compartir el código y archivos de un proyecto con una comunidad de usuarios y desarrolladores, que pueden colaborar en su crecimiento mediante la sugerencia de funcionalidades, corrección de código, aporte de código, etc.

Para este proyecto se ha creado un repositorio de GitHub [2], al que se han subido los archivos 3D, código y planos que se han generado. Una captura de pantalla de este repositorio se muestra en la Figura 21.

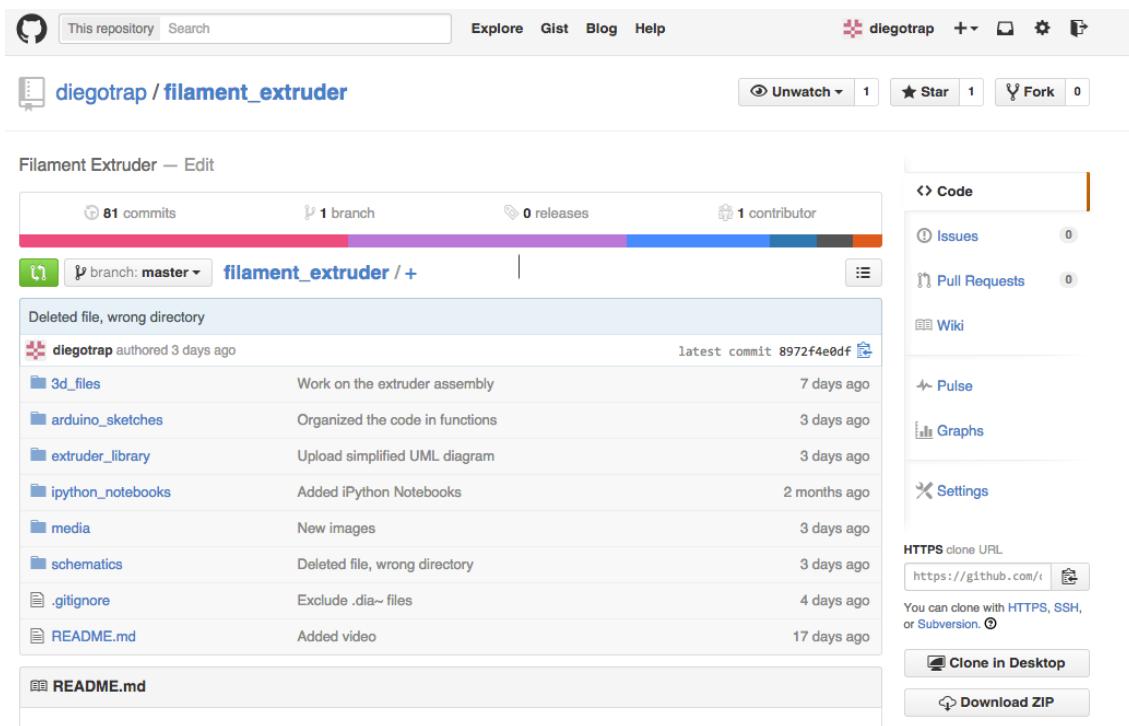


Figura 21 Captura del repositorio de GitHub del proyecto.

Mediante el uso de un repositorio online se espera que las fuentes del extrusor estén disponibles para cualquier otro usuario o institución interesado, cumpliendo con los objetivos de apertura y replicabilidad que se establecieron al comienzo del trabajo.

3.2.4 Software de impresión 3D

El proceso que va desde una pieza diseñada en un ordenador hasta su materialización en una impresora 3D requiere de una cadena de software específico. El primer paso es el programa de modelado 3D, en este caso FreeCAD, y el resto de software empleado, junto con su función se expone a continuación:

- El **software de laminado**, **Slic3r** [31] (software libre y gratis). Es el programa que se encarga de generar el código G-code (instrucciones de control para la impresora) a partir del modelo 3D de la pieza (en formato .stl).
- El **software de control de la impresora**, **Repetier-Host** [32] (gratis, pero no libre). Es el programa que permite controlar la impresora desde el ordenador, y que durante el proceso de impresión manda las instrucciones en G-code a la máquina.

3.3 Cálculos previos

3.3.1 Husillo

Dado que el husillo es el elemento fundamental del extrusor, la realización de cálculos relevantes requiere la determinación previa de un diámetro de partida. En esta sección se detallan las razones por las que se escoge el husillo empleado.

3.3.1.1 Geometría del husillo

Los husillos de extrusión son piezas de aleaciones de acero, que reciben tratamientos para aumentar su dureza superficial y disminuir el desgaste. Su geometría es objeto de un estudio minucioso, lo que, junto con la complejidad del mecanizado de sus formas, hace que tengan un coste elevado.

Debido a que el precio de los husillos convencionales y su disponibilidad los aleja del las condiciones establecidas para este proyecto, se decidió emplear una alternativa.

Las barrenas para madera tienen la forma helicoidal característica de los husillos, lo que permite el movimiento del polímero a través del extrusor. El tamaño de canal (la ranura) que presentan es adecuado para el tamaño de los pellets empleados, y su fabricación en acero también es conveniente. Se eligió una barrena de 16x400mm para cumplir con la longitud del husillo, que posteriormente tuvo que ser cortada. La broca se muestra en la Figura 22 y la Figura 23.



Figura 22 Imagen de la broca usada como husillo.



Figura 23 Imagen de la broca usada como husillo.

El uso de brocas (y más concretamente barrenas para madera) ha sido documentado por otros proyectos similares de extrusores de filamento, demostrando su idoneidad para el cometido.

La elección de la longitud del husillo (con $L/D \approx 20$) y la distribución de las zonas funcionales de este extrusor sigue el modelo de husillo estándar presentado en la sección de Análisis (página 23).

3.3.1.2 Diámetro del husillo

Como ya se ha discutido en el análisis del problema, la principal influencia del diámetro del husillo es la determinación de caudal mísico que procesa la máquina. A una velocidad dada, el caudal es proporcional al cubo del diámetro (véase Análisis dimensional de un extrusor).

Se trata por tanto de elegir un diámetro que de lugar a un extrusor con la capacidad de procesamiento deseada. Un diámetro demasiado grande, por otra parte, requiere más par al motor y alarga un extrusor que se diseña para un ratio L/D dado.

El diámetro de husillo elegido para el extrusor es de 16mm, disponible como diámetro nominal de barrenas para madera.

La razón más importante para decantarse por este diámetro es porque se ajusta bien al diámetro interior de las tuberías normalizadas NPS 1/2" [33], aunque puede ser necesario rebajar cordones de soldadura o rebabas. Este hecho es la razón por la que las soluciones desarrolladas emplean esta combinación de broca y tubo. La elección de una tubería normalizada para el barril del extrusor es acorde a la filosofía de reproducibilidad del diseño.

3.3.2 Estimación del caudal mísico del extrusor

Una de las variables de mayor interés para el dimensionamiento de los componentes del extrusor es el caudal mísico que será capaz de procesar. Para la obtención de estimaciones se ha empleado la correlación del diámetro descrita en [3, p. 132]. Esta correlación es un resultado empírico obtenido a partir de datos de extrusores reales.

El caudal mísico (\dot{m}), expresado en kg/h, de un extrusor operando a 50 revoluciones por minuto se puede aproximar con la correlación

$$\dot{m} = 0.277 \cdot D^3$$

donde D es el diámetro del husillo en centímetros. Se puede ver como efectivamente el caudal de un extrusor real es proporcional al cubo del diámetro (como se expone en 2.4.1).

Se escala la correlación para calcular el caudal a diferentes velocidades, empleando los resultados expuestos en los apartados Análisis dimensional de un extrusor y Modelo de placa plana; en ellos se justifica que en un extrusor en el que el flujo viscoso es dominante (y el flujo de presión es despreciable), el caudal mísico es proporcional a la velocidad del husillo.

$$\dot{m} = 5.54 \cdot 10^{-3} \cdot D^3 \cdot N$$

Se puede elaborar una tabla de caudales (Tabla 5) para diferentes velocidades de extrusión para obtener una velocidad estimada a la que el extrusor debe funcionar para obtener el caudal establecido en los requerimientos iniciales.

Tabla 5 Resultados de la correlación empírica para diferentes velocidades de husillo

Velocidad [rpm]	Caudal másico [kg/h]	Tiempo para extruir 1kg [h]
5	0.11	8.81
10	0.23	4.41
15	0.34	2.94
20	0.45	2.20
25	0.57	1.76
30	0.68	1.47
35	0.79	1.26
40	0.91	1.10
45	1.02	0.98
50	1.13	0.88
55	1.25	0.80
60	1.36	0.73

De esta forma también se comprueba cómo el diámetro de husillo escogido es suficiente para cumplir con los requerimientos a un régimen de revoluciones razonable (según la correlación, a partir de 10-15 rpm).

3.3.3 Escalado de las soluciones existentes

De los modelos analizados, el caso mejor documentado es el Lyman Filament Extruder. A partir de los datos que se han reunido sobre este diseño en la sección Análisis de las soluciones existentes, Tabla 3, se pretende extraer estos resultados a las dimensiones del extrusor de este proyecto.

En primer lugar, a igualdad de diámetro del husillo (como ocurre entre el Lyman Filament Extruder y el presente diseño), el caudal másico se considera proporcional a la velocidad del motor (véase páginas 26 y 29). El escalado de esta variable se realiza mediante la fórmula:

$$\dot{m}_2 = \frac{N_2}{N_1} \dot{m}_1$$

Sustituyendo los datos del extrusor Lyman ($\dot{m}_1 = 0.125 \text{ kg/h}$, $N_1 = 13.5 \text{ rpm}$) y el objetivo de este diseño ($\dot{m}_2 = 0.250 \text{ kg/h}$), se obtiene la velocidad mínima para cumplir con este requerimiento:

$$N_2 = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} N_1 = \frac{0.250 \text{ kg/h}}{0.125 \text{ kg/h}} \cdot 13.5 \text{ rpm} = 27 \text{ rpm}$$

En segundo lugar, a igualdad de diámetro, el par del motor es proporcional a la longitud del husillo. El escalado se realiza usando la fórmula:

$$T_2 = \frac{L_2}{L_1} T_1$$

Se sustituyen los datos del extrusor Lyman ($T_1 = 2.942 \text{ N}\cdot\text{m}$, $L_1 = 142 \text{ mm}$) y de este diseño ($L_2 = 320 \text{ mm}$, suponiendo $L/D = 20$):

$$T_2 = \frac{320 \text{ mm}}{142 \text{ mm}} \cdot 2.942 \text{ N}\cdot\text{m} = 6.63 \text{ N}\cdot\text{m}$$

En conclusión, el motor del extrusor deberá tener al menos $6.63 \text{ N}\cdot\text{m}$ y 27 rpm. Atendiendo a este resultado, se pudo dimensionar el sistema motor del extrusor y se eligió el motor 3273E del distribuidor Phidgets (véase página 57).

3.3.4 Simulación

Empleando los modelos descritos en la sección de análisis, se desarrolló un *notebook* de iPython que calculara los parámetros más importantes del extrusor. El archivo completo se puede consultar en el repositorio Github para su edición o ejecución; el nombre de archivo es `Extruder_Notebook.ipynb`.

Algunos de los datos de partida de la simulación se obtienen de los componentes del extrusor que se describen en la sección Componentes iniciales, ya que su determinación se realizó simultáneamente al proceso de simulación. Los resultados de ambas facetas del proceso de diseño se realimentaron mutuamente.

3.3.4.1 Estimación del caudal mediante correlación empírica

Mediante la correlación discutida en el apartado anterior, se obtienen las gráficas de las Figura 24 y Figura 25:

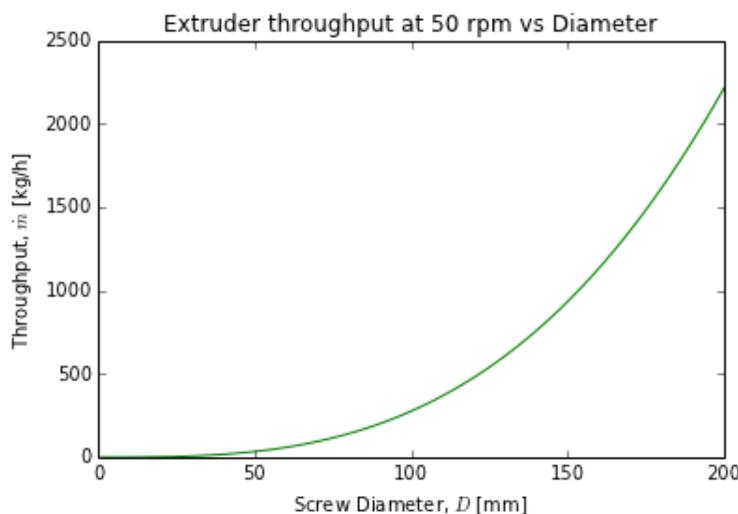


Figura 24 Caudal del extrusor (a 50rpm) vs Diámetro. Basado en la correlación empírica del diámetro.

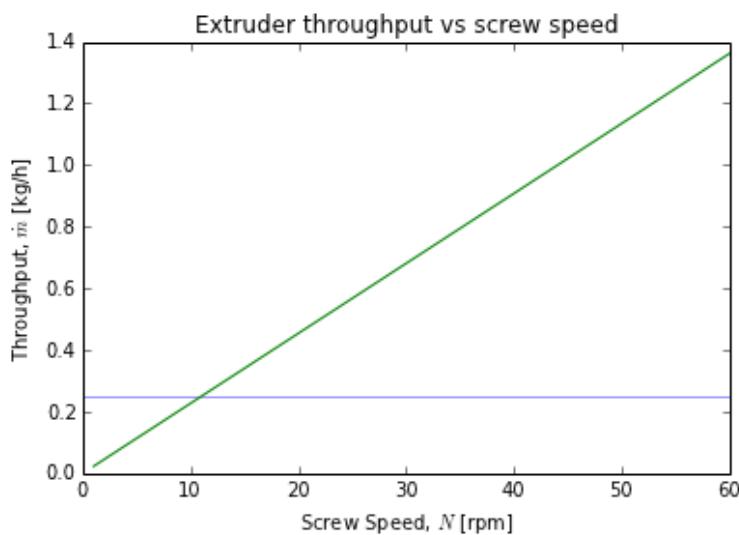


Figura 25 Caudal del extrusor vs velocidad del extrusor. Basado en la correlación empírica del diámetro.

3.3.4.2 Modelos de la característica del extrusor y la boquilla

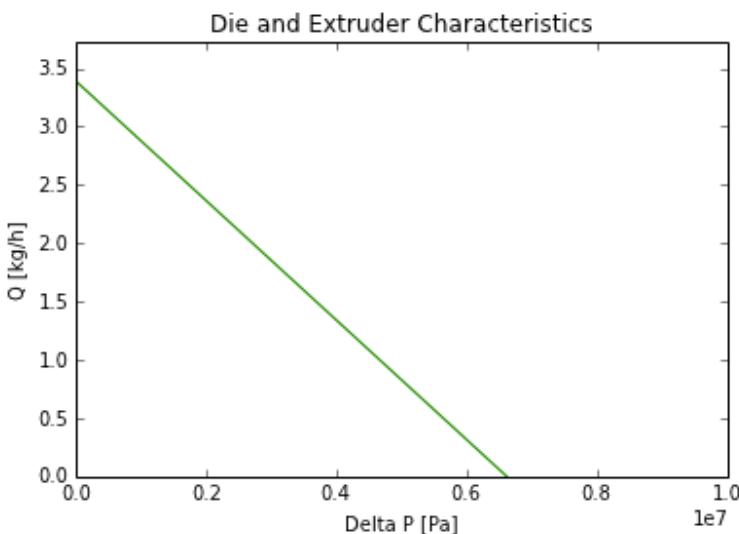


Figura 26 Característica del extrusor y la boquilla.

Al aplicar el modelo de la característica del extrusor y la boquilla al problema, se obtiene la gráfica de la Figura 26, en la que se puede observar que la característica de la boquilla no es visible, pues prácticamente coincide con el eje vertical. Esto quiere decir que la boquilla apenas limita el caudal del extrusor, generando una baja presión en el cabezal. El flujo del extrusor estudiado es principalmente viscoso.

3.3.4.3 Sensibilidad de la calidad del filamento

Para estudiar cómo influyen la velocidad del husillo y la presión en el cabezal en la calidad del producto, se incluye en la simulación un análisis de sensibilidad del diámetro del filamento a ambas variables. Los resultados obtenidos son los expuestos en la Figura 27.

A 1 percent increment in pressure causes a change of -0.000012 kg/h (-0.000341 percent) in throughput
A 1 percent increment in pressure causes a change of -0.000003 mm in filament diameter
Maximum allowed change to meet 0.1mm tolerance (0.05mm on each side): -15349.208764 percent
A 1 percent increment in screw speed causes a change of 0.033938 kg/h (1.000341 percent) in throughput
A 1 percent increment in screw speed causes a change of 0.009553 mm in filament diameter
Maximum allowed change to meet 0.1mm tolerance (0.05mm on each side) : 5.234202 percent

Figura 27 Resultados del análisis de sensibilidad

3.3.4.4 Resultados finales

La Tabla 6 contiene un resumen de los resultados obtenidos de la simulación.

Tabla 6 Resultados de simulación

Dimensiones básicas	
D	16 mm
Ratio L/D	20 mm
L	320 mm
Material	
Nombre	ABS
Viscosidad	1 Pa·s
Densidad	1.05 g/cm ³
Parámetros del sistema motor	
Velocidad	33.00 rpm
Par	8.09 N·m
Correlación del diámetro	
Caudal másico	0.75 kg/h
Modelo de la característica del extrusor y la boquilla	
Característica del extrusor	$-5.127 \cdot 10^{-7} x + 3.394$
Característica de la boquilla	$0.001503 x$
Presión de operación	2257.31 Pa

Caudal de operación	3.39 kg/h
Calidad del filamento	
Sensibilidad del caudal a la presión	Un incremento del 1% en la presión causa un cambio de -0.000012 kg/h (-0.000341%) en el caudal
Sensibilidad del diámetro a la presión	Un incremento del 1% en la presión causa un cambio de -0.000003 mm en el diámetro del filamento.
Variación máxima de presión para obtener una calidad de $\pm 0,05\text{mm}$	Cambio máximo permitido para obtener una tolerancia de $\pm 0,05\text{mm}$: 15349.208764%
Sensibilidad del caudal a la velocidad del husillo	Un incremento del 1% en la velocidad del husillo causa un cambio de 0.033938 kg/h (1.000341%) en el caudal
Sensibilidad del diámetro a la velocidad del husillo	Un incremento del 1% en la velocidad del husillo causa un cambio de 0.009553 mm en el diámetro del filamento
Variación máxima de velocidad del husillo para obtener una calidad de $\pm 0,05\text{mm}$	Cambio máximo permitido para obtener una tolerancia de $\pm 0,05\text{mm}$: 5.234202%

3.3.4.5 Conclusiones de la simulación

Todos los valores obtenidos mediante la simulación deben ser tomados como meras estimaciones ya que parten de modelos muy simplificados del funcionamiento de un extrusor. Sin embargo, se pueden obtener varias conclusiones de ellos:

- De acuerdo a los modelos cuantitativos simulados, los requerimientos pueden cumplirse con los componentes elegidos (detallados en las secciones Husillo y Componentes iniciales).
- El motor que se ha considerado (véase página 57) cumple sobradamente en términos de par y velocidad respecto a los requerimientos mínimos exigidos.
- En la aplicación del modelo de las características del extrusor y la boquilla, se han realizado muchas simplificaciones respecto al sistema real. Las cifras obtenidas deben considerarse simples estimaciones. A continuación se exponen las simplificaciones y efectos no considerados:
 - Las geometría del husillo se ha simplificado ampliamente (por el hecho de que una broca tiene un canal circular, en vez del canal rectangular de un husillo); también se ha podido comprobar como el resultado del caudal es muy sensible a las modificaciones de estas variables.
 - Las hipótesis del modelo de placa plana (véase página 27).
 - Se ha despreciado el efecto del flujo que escapa entre la broca y el barril.

- Se desprecia la caída de presión que ocurre en la boquilla antes de que el plástico pase por el orificio, que tiene una magnitud comparable a ésta última.
- Un resultado más realista que el que arroja el modelo de las características del extrusor y la boquilla ($\dot{m} = 3.39 \text{ kg/h}$) puede ser el de la correlación empírica ($\dot{m} = 0.75 \text{ kg/h}$)
- La combinación de un extrusor de baja capacidad con una boquilla de baja resistencia ha conducido a la operación del extrusor a baja presión, dominado por el flujo viscoso. De hecho, en la gráfica del modelo de las características del extrusor y la boquilla se puede observar como el extrusor opera prácticamente en el punto descarga abierta. Así, el caudal es muy poco sensible a la presión en el cabezal (variable que no podemos controlar directamente) y muy sensible a la velocidad del husillo. Por ello la velocidad del husillo debe ser mantenida constante.

3.4 Componentes iniciales

3.4.1 Barril

El diseño del barril está directamente relacionado con la elección del husillo. El requisito fundamental es que se ajuste correctamente al tornillo, con un espacio entre ambos de aproximadamente 0,001 veces el diámetro [4, p. 285].

El conjunto del barril se compone de piezas normalizadas de acero (excepto el tapón de bronce), roscadas para que su ensamblaje y desensamblaje sea sencillo. El acero inoxidable es el material que se suele emplear en los barriles de extrusores convencionales, por sus propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, y en este caso, al tener una resistencia térmica relativamente alta (comparado con otros metales), ayuda a retener el calor en las zonas designadas para ello.

Los tubos empleados se rigen por el estándar Nominal Pipe Size para tuberías. En concreto, los elementos son del tamaño NPS 1/2" [33]. Las rosas de cada pieza son del estándar National Pipe Thread Taper, del tamaño NPT 1/2"-14 [34].

El uso de elementos roscados es común en los diseños de extrusores de filamento estudiados; en este caso se ha optado por un diseño en el que la apertura de alimentación no estuviera mecanizada en el tubo, de manera similar a la solución empleada en el Lyman Extruder desde la versión 3 [21].

La relación de piezas que forman el conjunto del barril es:

- Tubo roscado de 10 pulgadas (254mm) de longitud.
- Tapón de bronce que forma la boquilla.
- Junta roscada para unir el tapón y el tubo.
- Brida de acero para unir el barril al resto del montaje.

El conjunto que se ha descrito se representa en la Figura 28.

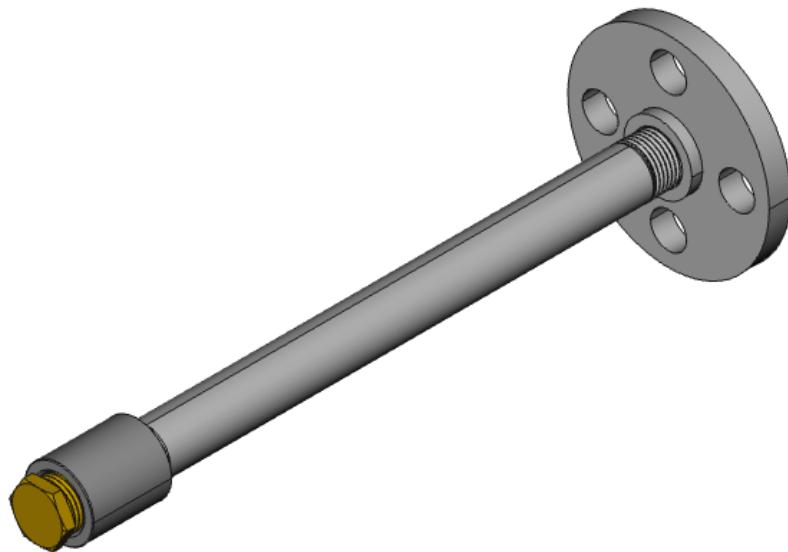


Figura 28 Conjunto del barril del extrusor.

Para aislar térmicamente el barril de la tolva se ha empleado una lámina de corcho natural situada entre la brida y el cuerpo del extrusor, que se puede ver en la Figura 29.



Figura 29 Imagen del aislante de corcho.

3.4.1.1 Operaciones de mecanizado

En la presentación de los objetivos de este proyecto se establece que, para permitir la reproducibilidad del diseño, se deben minimizar las operaciones de mecanizado, reduciéndose a ser posible exclusivamente al taladrado. El barril es la parte del extrusor más propensa a necesitar de este tipo de operaciones y se ha prestado atención en su diseño a este aspecto.

Sin embargo, se han realizado dos operaciones de mecanizado en las piezas del barril:

- El taladrado del orificio de salida en el tapón de bronce, lo que está dentro de los límites de las condiciones establecidas.

- El taladrado interior del tubo de acero, para eliminar el cordón de soldadura remanente de su proceso de fabricación. Esta operación es más difícil con medios diferentes de un torno o taladro de columna, ya que la longitud del tubo hace necesaria una herramienta de gran rigidez. Por ello es un aspecto mejorable del diseño y es conveniente buscar otras opciones más accesibles.

3.4.2 Motor

A partir del análisis de las soluciones existentes (página 50) y de la simulación (página 51) se pudo elegir un motor que permitiera cumplir con cierto margen de seguridad el criterio inicial de capacidad.

El motor elegido es el 3273E, del distribuidor Phidgets (mostrado en la Figura 30). Se trata de un motor de corriente continua acoplado a una reductora y encoder. La integración de la reductora permite obtener el par para esta máquina sin añadir más componentes, y el encoder permite leer la velocidad.



Figura 30 Imagen del motor empleado, 3273E de Phidgets. El conjunto contiene un motor DC, reductora y encoder óptico (Fuente: http://www.phidgets.com/images/3273E_0_Web.jpg)

3.4.2.1 Datos del motor, reductora y encoder

En esta sección se compilán las especificaciones del motor, reductora y encoder que forman el sistema motor del extrusor, en la tabla Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9. Los datos son los que se facilitan en la web del vendedor, Phidgets [35].

Tabla 7 Datos del motor.

Parámetro	Valor
Tipo de motor	DC Motor
Potencia	30 W
Velocidad máxima al voltaje nominal	33 RPM
Par nominal	82.6 kg·cm (8.1 N·m)
Par de detenimiento	558 kg·cm (54.7 N·m)

Voltaje nominal	24 V DC
Corriente nominal	2.2 A
Corriente de detenimiento	10.8 A
Diámetro del eje	12 mm
Longitud del cable	300 mm
Masa	1.7 kg

Tabla 8 Datos de la reductora.

Parámetro	Valor
Tipo de reductora	Planetary
Ratio	76 $\frac{49}{64}$: 1
Número de ruedas planetarias	3
Par máximo de la reductora	306 kg·cm (30.01 N·m)
Carga axial máxima del eje	200 N
Carga radial máxima del eje	100 N
Error de <i>backlash</i>	3°

Tabla 9 Datos del encoder.

Parámetro	Valor
Resolución	360 CPR
Tipo de conecto	E4P
Consumo de corriente mínimo	27 mA
Voltaje de alimentación mínimo	4.5 V DC
Voltaje de alimentación máximo	5.5 V DC

3.4.2.2 Control del motor

Se ha implementado un control de la velocidad del motor mediante modulación por ancho de pulso (PWM), empleando el driver MC33926 de Pololu, como se expone en mayor profundidad en la sección Control del motor.

3.4.3 Elementos mecánicos básicos

Los componentes del extrusor que se encargan de transmitir la potencia del motor al husillo y de restringir el movimiento del husillo son una serie de cojinetes y rodamientos, junto con un acoplador de eje.

Este diseño mecánico es similar al empleado en otras soluciones estudiadas, como el Lyman Extruder.

Los componentes mecánicos del extrusor son:

- Un cojinete axial (Figura 31) para transmitir la fuerza axial del husillo (originada por la presión en el cabezal) a la estructura del extrusor. De esta manera se evita que el eje del motor soporte fuerzas axiales, que pueden dañarlo.



Figura 31 Cojinete axial.

- Un rodamiento axial de bolas (Figura 32) que se apoya sobre el cojinete axial y también se asienta en el husillo para que la broca transmita su carga axial al cojinete y gire con la menor fricción.



Figura 32 Rodamiento axial de bolas.

- Un acoplador de eje de dos piezas (Figura 33), fabricado mediante impresión 3D, que transmite el movimiento de rotación del eje del motor al husillo.

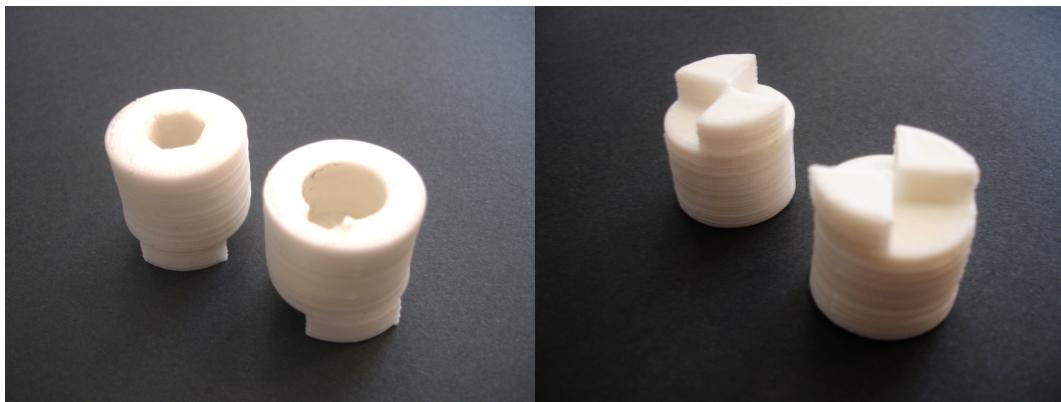


Figura 33 Vistas superior e inferior del acoplador de ejes.

- Un casquillo del diámetro del husillo (16mm), que soporta la carga radial del husillo contra la estructura del extrusor, y evita el desgaste de la pieza impresa.

El diseño mecánico, con las piezas impresas del prototipo, se muestra en la Figura 34.

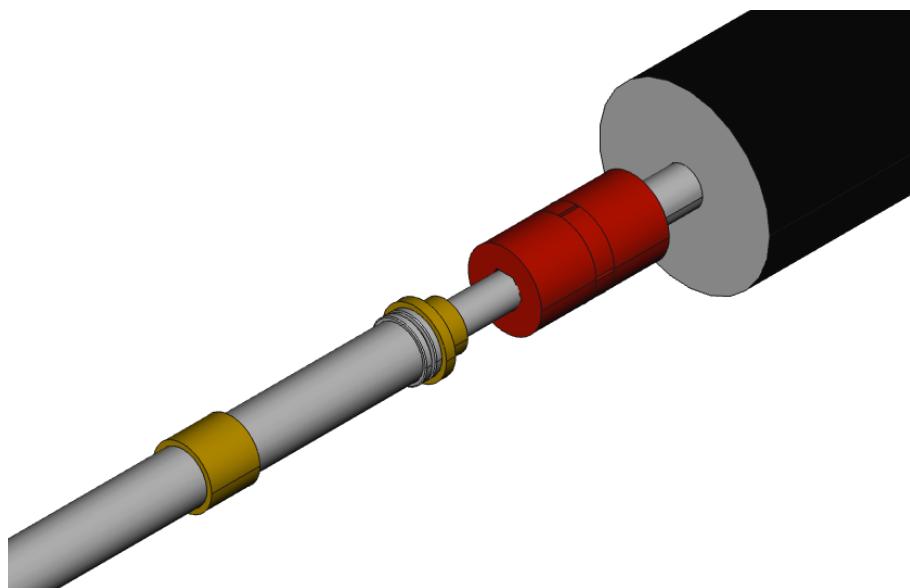


Figura 34 Detalle de los elementos mecánicos en el modelo 3D. De derecha a izquierda, se observan el motor (negro y gris), un modelo simplificado del husillo (cilindro gris) los acopladores del eje (rojo), el cojinete axial (dorado), rodamiento axial (gris) y el cojinete radial (dorado).

3.4.4 Raíl

Dado que se pretendía obtener un diseño relativamente modular, adaptable por otros usuarios y con la posibilidad de incluir otros elementos de la línea aparte del propio extrusor, el soporte de todos los componentes es un perfil de aluminio extruido, al que denominamos raíl.

La unión se realiza mediante tornillos de métrica 5 y 10 mm de longitud y tuercas en T insertadas en la ranura del perfil. Ambas piezas se muestran en la Figura 35.



Figura 35 Imagen de las tuercas en T y tornillos empleados para fijar las piezas al raíl.

Un ejemplo del uso de estas uniones para posicionar elementos modulares de la línea de extrusión se puede apreciar en la Figura 36.

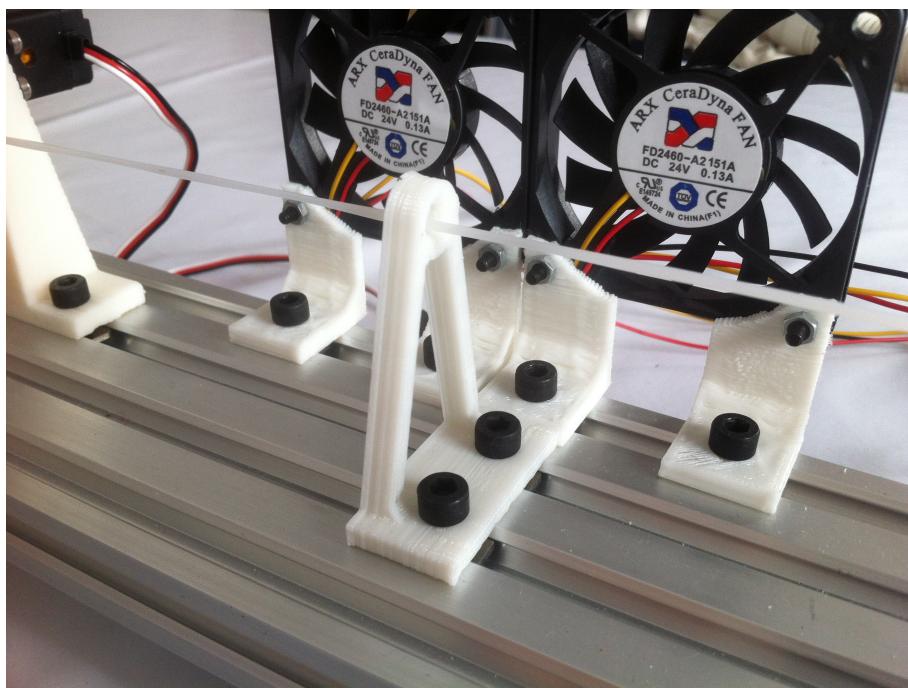


Figura 36 Detalle de la fijación de las piezas al raíl.

3.4.5 Polímero de extrusión

La resina elegida para la extrusión del filamento es ABS, ya que se trata de uno de los dos materiales (junto con el PLA) más empleados en impresión 3D.

Existe una gran variedad de fabricantes y referencias de ABS. En nuestro caso se optó por consultar los productos de la distribuidora Resinex, de cuyo catálogo se eligió una resina para inyección de elevada fluidez ($MFI = 28g/10\text{ min}$, 220° , 10kg), comparable a las que

emplean los fabricantes comerciales de filamento para impresión 3D (veáse Melt Flow Index (MFI)). La referencia del material elegido es MAGNUM 8391 ABS Resin.

La hoja de características de la resina empleada se puede consultar en el anexo 6.1.

3.5 Prototipo inicial

Como ya se ha expuesto, en el desarrollo del extrusor se construyó un prototipo inicial, con el objetivo de poner a prueba el concepto lo antes posible. En esta sección se presenta el prototipo, las pruebas y mejoras que se derivaron de su construcción.

El prototipo es una versión simplificada de lo que será el extrusor final, que incluye los elementos mínimos necesarios para poder hacer una prueba de extrusión. A partir de este modelo se implementaron diversas modificaciones, orientadas fundamentalmente a extender la funcionalidad y a simplificar la electrónica y mecánica.

3.5.1 Descripción del prototipo

Una imagen del prototipo en funcionamiento se muestra en la Figura 37.

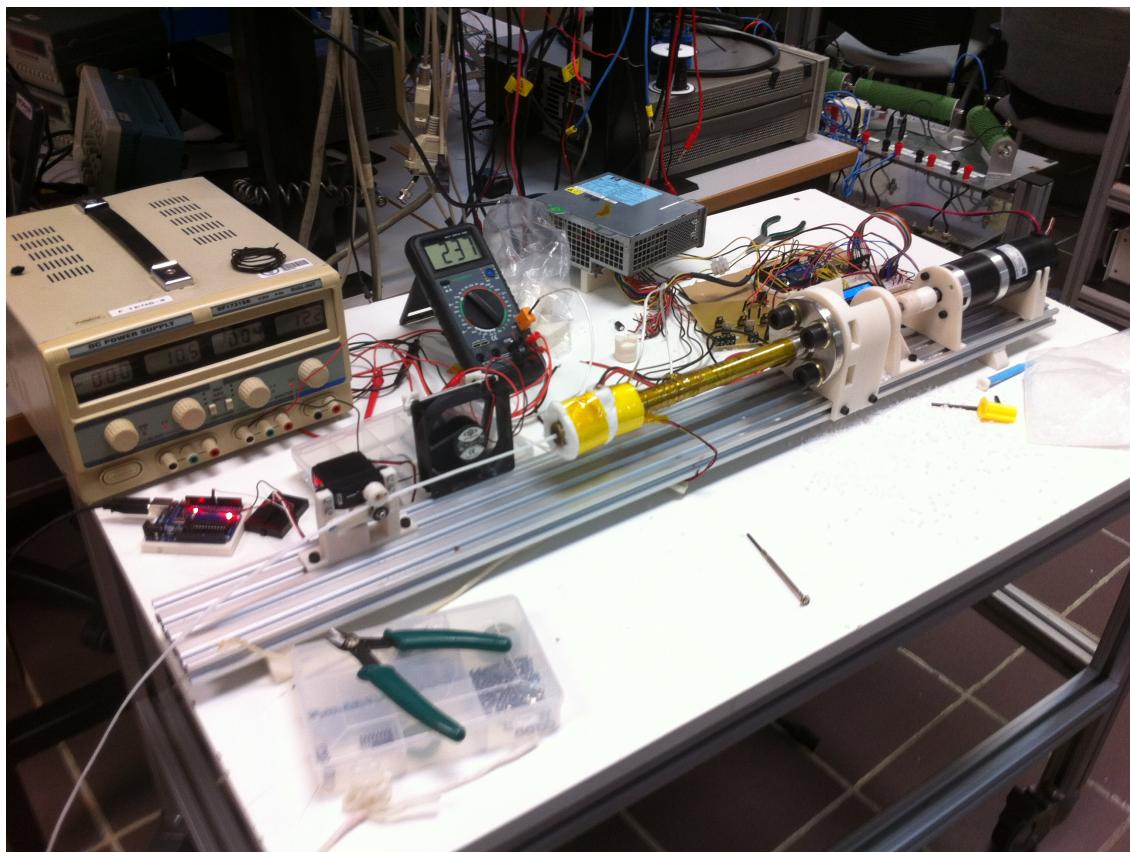


Figura 37 Imagen del prototipo inicial del extrusor.

Los sistemas que forman parte de este prototipo del extrusor son:

- El barril, sistema mecánico y motor descritos previamente en la sección de Componentes iniciales, montados sobre el raíl de aluminio.

- Un cuerpo impreso especialmente diseñado para el prototipo, que permite el ajuste de la colocación de las piezas hasta alcanzar la posición definitiva.
- Una zona de control de temperatura con su circuito de control.
- Una electrónica de control con pantalla LCD, que es una versión simplificada de la que se empleará finalmente.
- Un sistema de extracción (*puller*) para tirar del filamento, controlado por un microprocesador diferente del de la electrónica del extrusor (véase sección 3.6.4.1).
- Un ventilador que se conecta directamente a la fuente.
- La alimentación del sistema se realiza con una fuente de ordenador con salidas de 12 y 5 voltios.

Los sistemas que componen el prototipo se describen en profundidad en las secciones Componentes iniciales y en los apartados correspondientes de la sección Modelo final (debido a que son comunes a ambos modelos).

3.5.1.1 Electrónica del prototipo

El prototipo empleaba una electrónica menos completa que el modelo final, que se puede observar en la Figura 38. Las diferencias radican en:

- La pantalla LCD es un modelo más sencillo, que permitía un control más limitado de las variables y presentó problemas de fiabilidad.
- Soporte para un solo calentador.
- Alimentación a 12V del motor y calentadores
- Menor grado de integración de los componentes, mayor uso de cables y placas de prototipado.

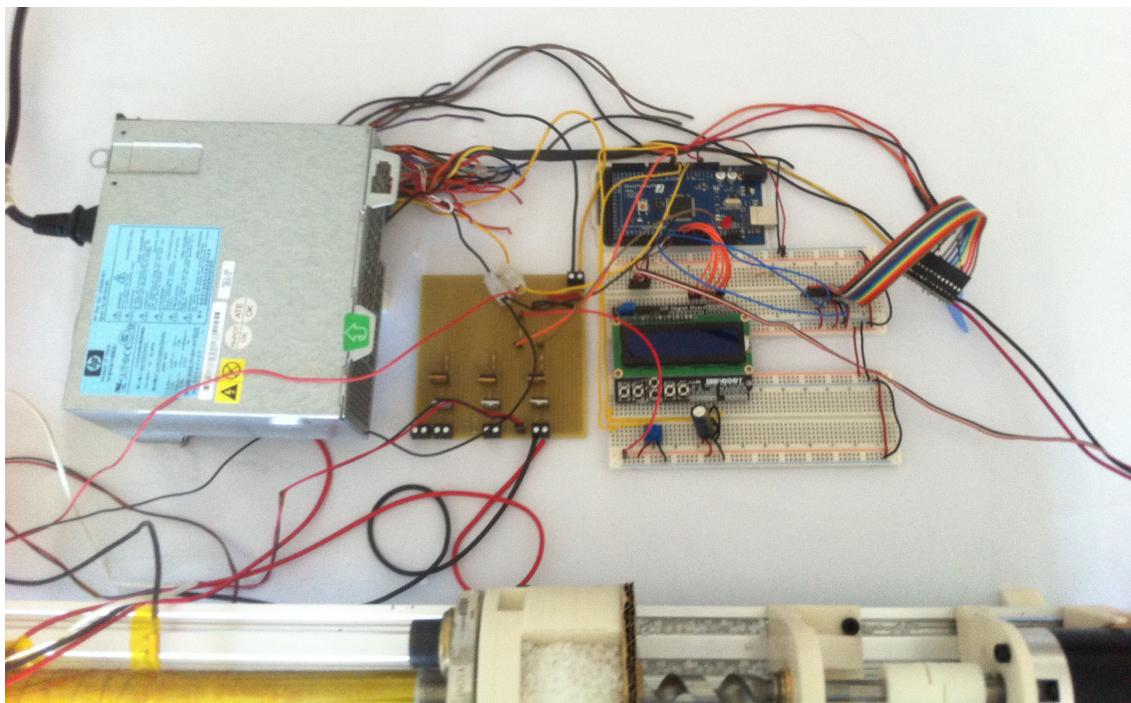


Figura 38 Imagen de la electrónica del prototipo.

3.5.1.2 Piezas impresas del prototipo

Se diseñó una serie de piezas impresas específicamente para el prototipo que no están presentes en el modelo final. La característica principal de estas piezas es que permiten ajustar individualmente su posición en el raíl, en contraposición al cuerpo definitivo que se ensambla en un conjunto fijo.

Estas piezas son:

- **Tolva y soporte del barril**, que contiene el sistema de alimentación de granza y dónde se atornilla el barril.
- **Soporte del cojinete axial**, dónde se apoyan los rodamientos que manejan la carga axial del husillo.
- **Soporte del motor**, dónde se atornilla el motor.

Una representación de las piezas impresas que se han citado se puede ver en la Figura 39.

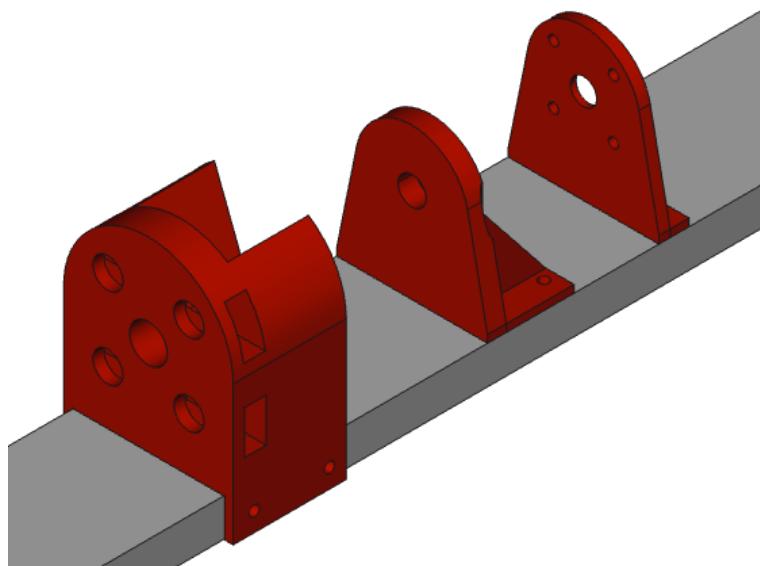


Figura 39 Piezas del cuerpo del prototipo. De izquierda a derecha, son tolva y soporte del barril, soporte del cojinete axial y soporte del motor.

3.5.2 Evaluación del prototipo

El prototipo demostró ser funcional, se hicieron pruebas para comprobar su funcionamiento y la calidad del filamento que produce, que resultaron satisfactorias.

- El resultado más importante fue comprobar que todo el sistema era capaz de funcionar adecuadamente para producir el filamento.
- Segundo, se pudo comprobar que la combinación de motor, barril, acoplador de ejes y piezas impresas empleado es capaz de soportar las fuerzas derivadas del proceso de extrusión sin sufrir daños. El dimensionamiento de elementos como el motor y calentadores también resultó suficiente.

- Por último, la calidad del filamento obtenido, sin llegar al nivel del producto comercial, resultó aleatoria.

3.5.2.1 Calidad del filamento

Se empleó el procedimiento descrito en la sección 2.5.3, para caracterizar la calidad del filamento. Las pruebas que se realizaron con el prototipo son las que van desde el 2014/07/28 hasta el 19/08/2014.

Las hojas de datos y resultados se reúnen en los anexos de este documento (anexo 6.5). La interpretación que se hace de los resultados obtenidos comprende los siguientes puntos:

- No se detectaron quemaduras, burbujas externas u otros defectos visuales en las muestras estudiadas.
- En el mejor de los casos ensayados, el diámetro del filamento pudo ser contenido dentro de un rango de 0.49 mm, obteniéndose un diámetro de 2.66 ± 0.31 mm.
- El valor medio del diámetro puede variar de un ensayo a otro, sin embargo se considera de importancia secundaria frente al rango de la tolerancia, ya que puede ser regulado a voluntad variando la velocidad del *puller*.

3.5.3 Mejoras propuestas sobre el prototipo

Después de probar el prototipo, se propuso la mejora de algunos aspectos fundamentales, encaminados a:

- La unificación de toda la electrónica bajo un único sistema (uniendo el control del *puller* y ventilador al del extrusor). Asimismo, reducir en la medida de lo posible la complejidad del cableado.
- La adaptación del sistema a la alimentación de 24V, para aprovechar la velocidad máxima del motor.
- El desarrollo de una interfaz de usuario mejorada, que muestre todas las variables del proceso, permita modificarlas y no presente tantos problemas técnicos como la pantalla empleada en el prototipo.
- La unificación del software bajo una librería del extrusor.
- La unificación de las piezas impresas del cuerpo del extrusor, formando una nueva estructura ensamblable, para asegurar que la posición relativa de los elementos del extrusor sea siempre la misma (a diferencia de las piezas del prototipo en las que lo que primaba era la posibilidad de ajustar su posición). Además, se debe hacer más rígido el soporte del cojinete axial, ya que la pieza del prototipo flecta durante la operación del extrusor.
- La inclusión de dos módulos calentadores más, para obtener un extrusor de tres zonas.
- El movimiento oscilatorio del filamento al abandonar el extrusor se pretende reducir añadiendo guías impresas y con un recubrimiento de goma en la rueda del *puller*.

3.6 Modelo final

Las mejoras que se han propuesto en los apartados anteriores se van a implementar para dar lugar a un modelo de extrusor definitivo. En la Figura 40 se muestra una imagen del propio extrusor, el sistema desarrollado también incluye otros elementos de la línea y mayor integración de la electrónica.

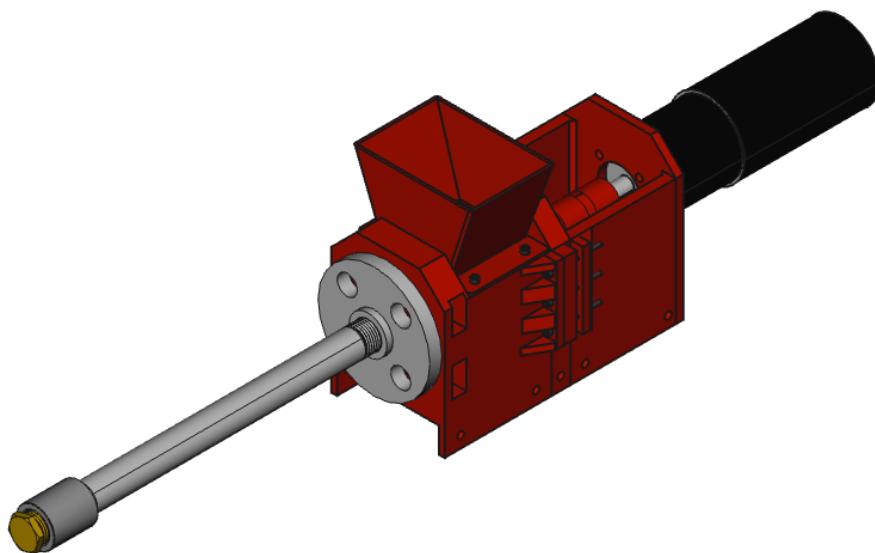


Figura 40 Modelo 3D del extrusor.

3.6.1 Diseño mecánico

En esta sección se presentan los elementos mecánicos que forman parte del extrusor.

Muchos de los componentes mecánicos del diseño han sido ya discutidos en esta memoria debido a que fueron elegidos en las fases iniciales del diseño o empleados en el prototipo. Se puede consultar la información sobre el barril (pág. 55), motor (pág. 57), transmisión de potencia (pág. 59) y raíl (pág. 60) en los epígrafes correspondientes. Sin embargo, en esta sección se presentan el cuerpo del extrusor y las piezas impresas empleadas en el diseño.

3.6.1.1 Cuerpo del extrusor

El cuerpo del extrusor se ha diseñado como un bloque ensamblable de 4 piezas impresas. Funcionalmente, contiene elementos de la tolva, alimentación y sistema motor, además de servir de fijación para el barril y el motor.

El diseño de una estructura integrada se derivó de la necesidad de que las piezas que forman el cuerpo mantuvieran su posición relativa unas respecto a otras sin necesidad de un proceso de calibración (cómo ocurre en el prototipo) y a pesar de las fuerzas que actúan sobre ellas. Además, la pieza sobre la que se asienta el cojinete axial soporta la carga del husillo, y en el prototipo se observó que el esfuerzo flectaba la pieza. Para aumentar su rigidez se empleó una pieza impresa con relleno al 100% (mientras que la mayoría de piezas del diseño sólo tienen un 25%) y 6 puntos de fijación mediante tornillos.

Se puede consultar una vista ensamblada y otra explotada del cuerpo en la Figura 41 y la Figura 42.

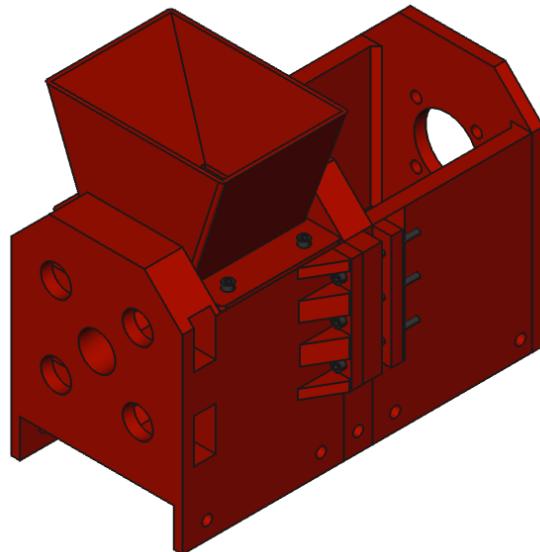


Figura 41 Vista ensamblada del cuerpo del extrusor.

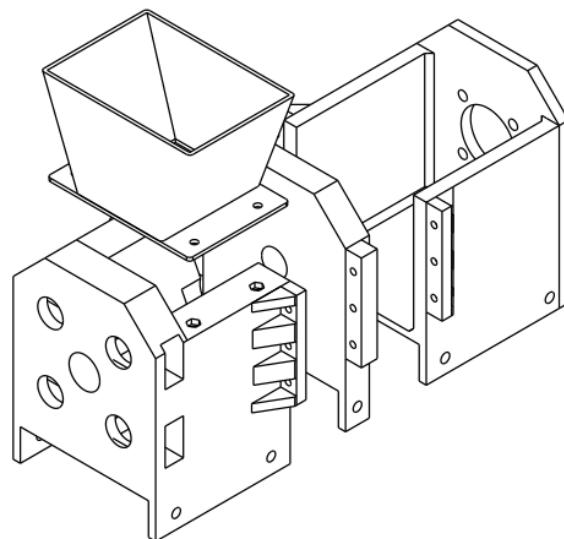


Figura 42 Vista explotada del cuerpo del extrusor, en la que se pueden observar las 4 piezas impresas que lo componen.

3.6.1.2 Piezas impresas

3.6.1.2.1 Consideraciones sobre el uso de piezas impresas

El uso de piezas impresas mediante la tecnología FDM en un modelo funcional puede ser aceptable, pero requiere la consideración de las siguientes limitaciones, que se han tenido en cuenta al diseñar las piezas del extrusor:

- **Limitaciones a la fabricabilidad de las piezas**, que deben cumplir con requisitos de geometría como dimensiones dentro de la zona de trabajo de la

impresora, soportarse sobre un plano horizontal de impresión y no tener salientes o superficies horizontales suspendidas en el aire. El diseño puede ser dividido en piezas más pequeñas o sencillas para cumplir estos requisitos.

- **Limitación en las tolerancias de fabricación**, que dependen de muchos factores: de la calibración de la impresora, de los parámetros de impresión elegidos, del proceso de generación de las instrucciones para la impresora, de la contracción del material... Por ello en muchos casos el diseño de las piezas ha requerido varios ensayos de prueba-error o el reprocesamiento posterior mediante limado o eliminación de los excesos de material.
- **Limitación en las propiedades del material**. Debido al uso de plástico y de que las piezas de impresión 3D generalmente no son macizas, sino parcialmente huecas, las propiedades mecánicas y la resistencia a la temperatura deben ser consideradas. En este caso, se optó por aumentar el grado de relleno de las piezas más requeridas mecánicamente y por el uso de un elemento aislante entre el barril y el cuerpo del extrusor que evita que el calor fluya a las piezas impresas.

En este proyecto se han intentado superar las relativas limitaciones de la impresión 3D mediante las estrategias expuestas. De esta manera se puede hacer uso de esta tecnología, que permite la fabricación de piezas a medida en un tiempo razonable y a un coste económico, adaptándose a la filosofía del proyecto.

3.6.1.2.2 Archivos 3D del proyecto

Todos los archivos 3D generados para el proyecto se encuentran reunidos en el repositorio online de este proyecto [2]. Se ofrecen dos archivos para cada modelo 3D:

- Un archivo de FreeCAD (extensión .fcstd), que permite ver y editar las piezas mediante este software (véase sección FreeCAD).
- Un archivo de *STereoLitography* (extensión .stl), que es el formato que se usa en impresión 3D.

Los archivos del repositorio están disponibles para cualquier usuario que desee descargarlos, modificarlos y crear sus propias versiones de ellos. Este enfoque se justifica con los objetivos del proyecto, que incluyen que el resultado del proyecto sea compartido con la comunidad de usuarios interesados.

3.6.1.2.3 Parámetros de impresión

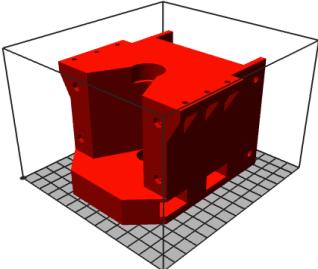
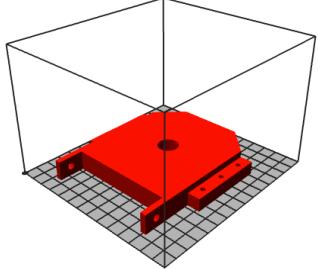
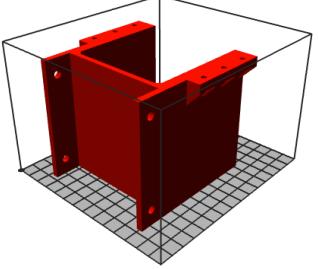
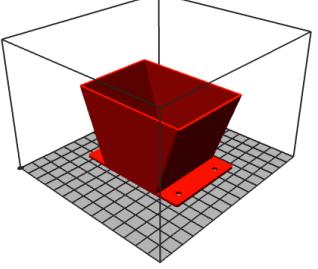
Los parámetros de impresión más relevantes empleados en el proyecto se detallan a continuación:

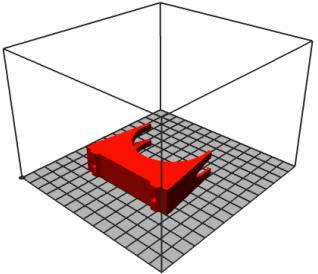
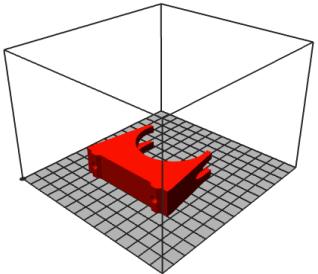
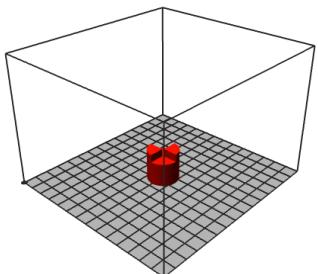
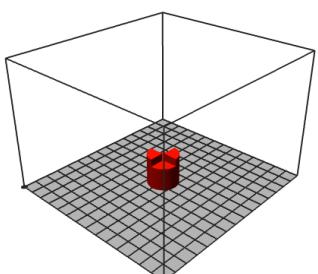
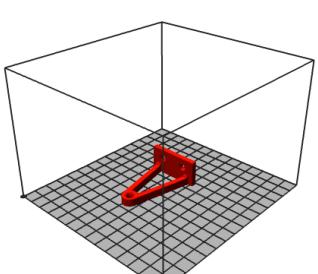
- Material: PLA
- Temperatura de impresión: 190°C
- Altura de capa: 0.4 mm
- Patrón de relleno: Panal de abeja (excepto en piezas con 100% de relleno, donde es recto)
- 2 perímetros exteriores
- Velocidad de impresión:
 - Perímetros: 40mm/s
 - Relleno: 60mm/s

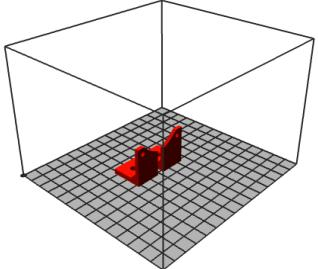
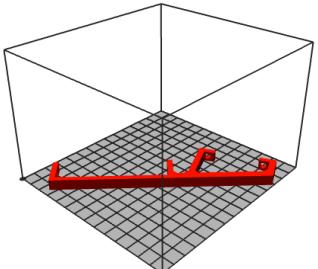
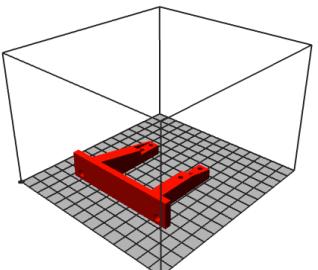
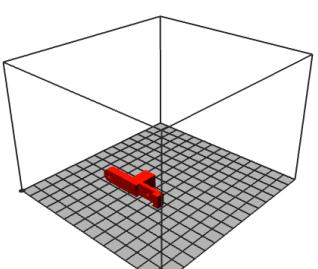
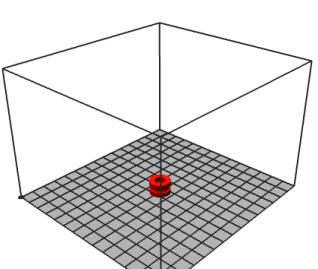
Las piezas han sido diseñadas en la medida de lo posible para evitar el uso de material de soporte. Un ejemplo de ello son la minimización de las superficies horizontales suspendidas en el aire que se han sustituido por transiciones angulares más suaves.

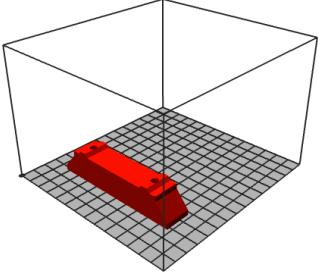
En la Tabla 10 se detalla la posición de impresión, el uso de material de soporte y el porcentaje de relleno particularizado para cada pieza.

Tabla 10 Parámetros de impresión para cada pieza. El tiempo de impresión y la masa son estimaciones del software de impresión.

Pieza / Archivo	Modelo 3D y posición de impresión	Relleno	Material de soporte	Tiempo de impresión	Masa
Soporte de la tolva y el barril hopper_and_barrel_support.stl		25%	No	5h 02min	228g
Soporte del rodamiento axial thrust_bearing_support.stl		100%	No	3h 24min	141g
Soporte del motor motor_support.stl		25%	No	3h 32min	118g
Tolva hopper.stl		25%	No	1h 19min	35g

Soporte del peso del motor diámetro grande		25%	Sí	39min	22g
vslot_motor_supor t_big.stl					
Soporte del peso del motor diámetro pequeño		25%	Sí	40min	23g
vslot_motor_supor t_small.stl					
Acoplador de eje de chavetero		100%	No	16min	8g
shaft_coupler_key way.stl					
Acoplador de eje hexagonal		100%	No	19min	8g
shaft_coupler_hex .stl					
Guía del filamento		25%	No	18min	5g
filament_guide_sm aller.stl					

Soportes de ventilador fan_holder_left.stl, fan_holder_right.stl		25%	No	22min	6g
Soporte del panel LCD lcd_holder.stl		25%	No	18min	8g
Estructura del puller puller_structure_simplified_fixed.stl		25%	No	33min	17g
Palanca del puller puller_lever_with_spring.stl		25%	No	10min	3g
Rueda del puller puller_wheel.stl		100%	No	3min	2g

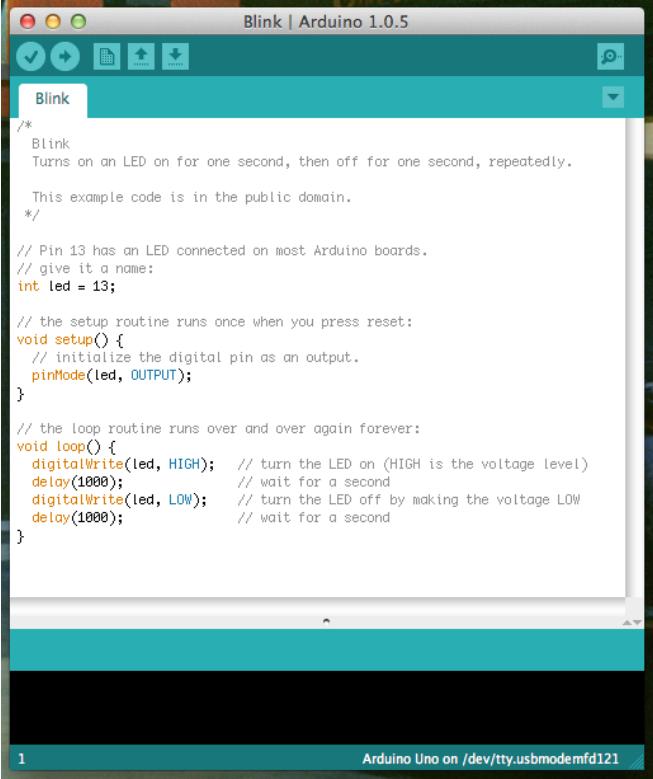
Pie para el perfil de aluminio		25%	No	32min	17g
<hr/>					
vslot_foot.stl		Total		17h:27min	641g

3.6.2 Diseño electrónico

3.6.2.1 Arduino Mega

Arduino es una plataforma open source que comprende una placa microcontroladora y un entorno con librerías para programarla.

Las placas de Arduino contienen un microcontrolador Atmel AVR (en el caso de la placa empleada, un ATmega2560 de 8 bits), una toma USB para programar la placa, sistema de alimentación y tiras de pines hembra para conectar los periféricos externos. Además, la plataforma provee de un entorno de programación sencillo, el Arduino IDE, que permite la programación de proyectos sencillos. Una captura de pantalla de este programa se puede ver en la Figura 43.



```

Blink | Arduino 1.0.5

Blink
Blink
Turns on an LED on for one second, then off for one second, repeatedly.

This example code is in the public domain.

/*
// Pin 13 has an LED connected on most Arduino boards.
// give it a name:
int led = 13;

// the setup routine runs once when you press reset:
void setup() {
  // initialize the digital pin as an output:
  pinMode(led, OUTPUT);
}

// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
  digitalWrite(led, HIGH);    // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000);               // wait for a second
  digitalWrite(led, LOW);     // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000);               // wait for a second
}

```

Figura 43 Captura del IDE de Arduino.

3.6.2.1.1 Elección de la plataforma Arduino

Las razones que se han considerado para la elección de la plataforma Arduino, frente a otras placas microcontroladoras, son:

- La gran cantidad de información sobre esta plataforma disponible en internet, ya que se ha convertido en un estándar de facto en los proyectos de hardware libre.
- Existencia de librerías para interactuar con una gran variedad de dispositivos: encoders, pantallas LCD, servos...
- La amplia disponibilidad de las placas Arduino en tiendas físicas y online.
- La amplia gama de productos de la familia ofrece soluciones para proyectos de distinta envergadura.
- Es una placa de prototipado, lo que la hace adecuada para este proyecto.

La plataforma Arduino simplifica el acceso del usuario a las funciones de microcontrolador, disminuyendo la barrera de entrada a la disciplina y el tiempo de desarrollo del proyecto. Esta capa intermedia a priori no permite el control explícito de todos los recursos del micro.

Las limitaciones impuestas por este hecho pueden ser salvadas mediante el uso de herramientas alternativas disponibles dentro de la propia plataforma (por ejemplo, el soporte de la librería para interrupciones externas o contador de milisegundos) y con librerías externas que se encargan de gestionar los dispositivos que requieren un control de más bajo nivel. Existen también librerías desarrolladas por la comunidad para acceder a algunos periféricos del micro, e incluso la posibilidad de programarlo directamente con un entorno de programación para procesadores de Atmel.

3.6.2.1.2 Especificaciones del Arduino Mega

Se eligió el modelo Arduino Mega porque es la placa de la familia que tiene los suficientes pines como para conectar el número de dispositivos que requiere el extrusor y el resto de componentes de la línea.

Las especificaciones resumidas de la placa Arduino Mega 2560 se muestran en la Tabla 11 Especificaciones del Arduino Mega 2560. Fuente: .[36].

Tabla 11 Especificaciones del Arduino Mega 2560. Fuente: .[36]

Parámetro	Valor
Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje	5V
Voltaje de alimentación recomendado	7-12V
Límites voltaje alimentación	6-20V
Pines I/O Digital	54 (de los cuales 15 son PWM)
Pines de entrada analógicos	16
Corriente DC por Pin I/O	40 mA
Corriente DC por Pin 3.3V	50 mA

Memoria flash	256 KB de los cuales 8 KB son usados por bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Frecuencia reloj	16 MHz

3.6.2.1.3 Programación

La programación de la placa para controlar el extrusor se realiza en C/C++, este proceso se detalla en la sección de Software.

3.6.2.1.4 Recursos empleados

Se ha hecho uso explícitamente de algunos de los recursos que ofrece el microprocesador, a saber:

- Entradas y salidas digital de propósito general (GPIO).
- Salidas PWM para controlar el motor y los calentadores. La generación de señales PWM se realiza mediante la función `analogWrite()` [37], disponible en el entorno Arduino.
- Entradas analógicas para leer los termistores.
- Recursos de temporización, mediante la función `milliseconds()` de la librería Arduino, que devuelve un contador de milisegundos.

Otros recursos, como interrupciones externas o temporizadores, han sido accedidos por las librerías que se emplean en este proyecto. Por ejemplo, la librería empleada para gestionar los encoders hace uso de interrupciones externas para leer la señal del dispositivo.

La lista completa de pines ocupados y su función se encuentra detallada en la Tabla 12.

Tabla 12 Pines empleados.

Pin	Señal	Función
2	Encoder del motor A	Entrada digital (con interrupción externa)
3	Encoder del motor B	Entrada digital (con interrupción externa)
4	Control motor PWM	Salida digital PWM
5	Control motor LOW	Salida digital genérica
8	Control del ventilador/ventiladores	Salida digital genérica
9	Control de calentador 3	Salida digital PWM
10	Control de calentador 2	Salida digital PWM
11	Control de calentador 1	Salida digital PWM
12	Señal de velocidad del puller	Salida digital PWM

A0	Señal del termistor 3	Entrada analógica
A1	Señal del termistor 2	Entrada analógica
A2	Señal del termistor 1	Entrada analógica
20	Encoder del LCD A	Entrada digital (con interrupción externa)
21	Encoder del LCD B	Entrada digital (con interrupción externa)
41	Botón del LCD	Entrada digital genérica
44	LCD señal digital 7	Salida digital genérica
45	LCD señal digital 6	Salida digital genérica
46	LCD señal digital 5	Salida digital genérica
47	LCD señal digital 4	Salida digital genérica
48	LCD Register Select	Salida digital genérica
49	LCD Enable	Salida digital genérica

3.6.2.2 Control del motor

El control del motor se realiza mediante un driver específico para motores de corriente continua, el MC33926 Motor Driver Carrier del fabricante Pololu. Una imagen del mismo se muestra en la Figura 44.

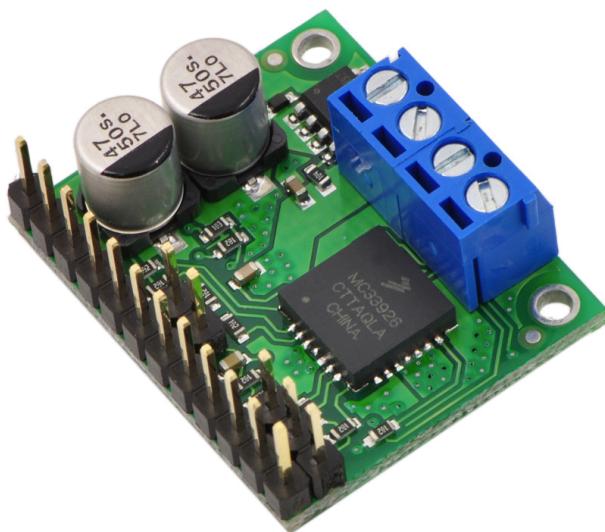


Figura 44 Imagen del driver MC33926 de Pololu. Fuente: Pololu (<http://www.pololu.com/picture/view/0J1815>)

La placa MC33926 Motor Driver Carrier de Pololu incorpora un puente H integrado MC33926 del fabricante de semiconductores Fairchild. Puede controlar motores de entre 5 y 28 V y soportar corrientes de 3 A de manera continua, manejando picos de hasta 5 A [38]. Estas características lo hacen adecuado para el control del motor elegido.

Se ha evaluado la opción de introducir un control en lazo cerrado, mediante un control PID, para regular la velocidad del motor, dado que la velocidad del motor está disponible a través del encoder. No se ha implementado esta opción porque el control en lazo abierto ya ofrece unos resultados satisfactorios.

El control se realiza en uno de los modos de funcionamientos más sencillos del driver. La placa cuenta con las entradas de alimentación a 0 y 24V. A su vez el motor se conecta en la clema contigua. Dos pines del microcontrolador se conectan a las entradas que controlan las salidas del motor, una de ellas siempre está en cero lógico y la otra recibe una señal PWM. Con ello se puede controlar la velocidad del giro del motor en un sentido, que es lo que requiere este proyecto.

3.6.2.3 Calentadores

Los calentadores son cada uno de los módulos que permiten controlar la temperatura de una zona del barril.

Los componentes que forman un calentador son:

- Un **elemento calefactor**, de hilo de *nicrome*, que consume potencia eléctrica para calentar la zona.
- Circuito de control del elemento calefactor, que lo conecta y desconecta.
- Un **termistor**, que se coloca en la zona a controlar y varía su resistencia dependiendo de la temperatura, de modo que ésta última pueda ser leída por el sistema
- **Circuito de acondicionamiento del termistor**, para poder medir el valor de la temperatura con una de las entradas analógicas del microcontrolador.

Denominamos calentadores a cada uno de los módulos compuestos por un elemento calefactor y un termistor, además de los circuitos auxiliares, que permiten mantener una zona del barril a una temperatura determinada.

3.6.2.3.1 Elemento calefactor

El elemento calefactor se ha construido utilizando hilo de *nicrome*. Es un material que se emplea en la fabricación de elementos calefactores, y en este caso era adecuado porque al tratarse de un hilo se puede dimensionar la resistencia del calentador para un valor determinado (simplemente colocando la longitud adecuada de hilo).

El hilo se coloca enrollado sobre el tubo del barril, donde previamente se ha colocado una capa de cinta *kapton* (cinta resistente a altas temperaturas, aislante eléctrico). Igualmente, se tomó la precaución de cubrir toda la longitud del hilo con una capa de cinta, para evitar que el contacto de las vueltas de la bobina pudiera provocar un cortocircuito. La unión entre el hilo de *nicrome* y el cable de alimentación debe ser mecánica para soportar las altas temperaturas; para ello se emplean clemas metálicas.

El proceso de montaje de estos elementos se puede ver en la Figura 45.



Figura 45 Diferentes fases del proceso de construcción del elemento calefactor.

3.6.2.3.1.1 Dimensionamiento del elemento calentador

Mediante los resultados obtenidos en el ensayo del prototipo, se pudo determinar que una potencia de 48W es suficiente para alcanzar temperaturas de hasta 300° en el tubo del extrusor y fundir el polímero.

La resistencia del hilo de *nicrome* se puede expresar en ohmios por metro, que mediante una medida con el polímetro se determinó que para el hilo utilizado era de 10 Ω/m. La resistencia necesaria para obtener 48W de potencia a 24V es:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{24V^2}{12W} = 12 \Omega$$

Lo que equivale a una longitud de 1.2 m del hilo de *nicrome* empleado.

La corriente que circulará por el hilo y por el circuito de control es de

$$I = \frac{V}{R} = \frac{24V}{12\Omega} = 2 A$$

3.6.2.3.2 Circuito de control del elemento calefactor

El circuito de control del elemento calefactor es un circuito de conmutación, operado por un transistor MOSFET y al que se ha añadido la protección de un diodo de libre circulación.

El esquemático de este circuito se muestra en la Figura 46, y una relación de los elementos empleados en la Tabla 13.

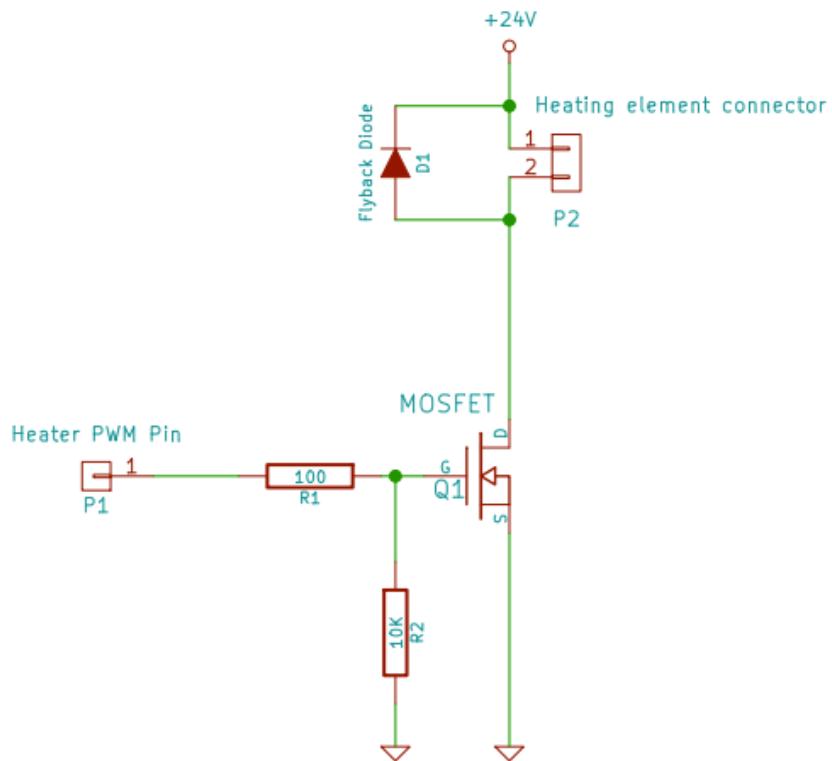


Figura 46 Circuito del calentador.

Tabla 13 Componentes del circuito del calentador.

Componente	Descripción	Referencia / Valor
Q1	MOSFET de canal N y nivel lógico	IRL540N
D1	Diodo de libre circulación	RHRP1560
P1	Conexión al pin PWM	Pin macho para PCB 2.54mm
P2	Conexión elemento calefactor	Clema 2 conectores PCB 2.54mm
R1	Resistencia limitadora de corriente	100Ω
R2	Resistencia de pull-down	10kΩ

3.6.2.3.2.1 Elección de los componentes

- El **transistor MOSFET IRL540N** se eligió por tratarse de un dispositivo de nivel lógico (capaz de ser controlado por la salida de 5V de un microcontrolador) y por estar disponible localmente. Sus especificaciones de $V_{DSS} = 100$ V e $I_D = 36$ A [39] lo hacen capaz de soportar requerimiento mucho más exigentes de las que se encontrará en esta aplicación (24 V y 2 A).
- El **diodo RHRP1560**, de la misma manera, se eligió por estar disponible en una tienda física local. Sus parámetros, 15A y 600V [40], lo hacen más que suficiente

para esta aplicación. Aunque la carga (elemento calentador) es teóricamente resistiva, se coloca este diodo de libre circulación por el carácter inductivo que pueda tener la significativa longitud de hilo de *nicrome* enrollado.

- Las **resistencias** son modelos de 1/4W y cada una cumple una función:
 - La resistencia de pull-down se emplea para que la puerta del transistor no flote y provoque el encendido inintencionado del elemento calentador.
 - La resistencia limitadora de corriente establece un límite de intensidad en las transiciones del MOSFET
- Los **conectores** que se emplean son clemas para las uniones por las que circula más corriente y pinos macho de 2.54mm para las señales y conexiones de baja intensidad.

3.6.2.3.3 Circuito de acondicionamiento del termistor

Para permitir la lectura de la temperatura por el ADC del microcontrolador empleado, es suficiente con acondicionar el termistor con un divisor de tensión.

El esquema del circuito se muestra en la Figura 47, y los componentes utilizados en la Tabla 14.

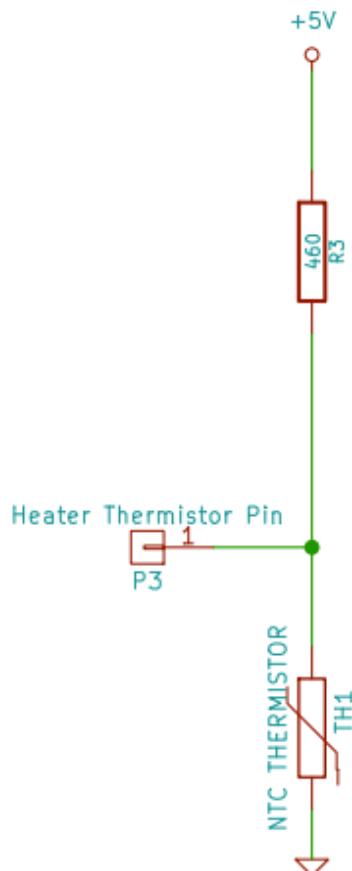


Figura 47 Circuito de acondicionamiento del termistor.

Tabla 14 Componentes del circuito de acondicionamiento del termistor.

Componente	Descripción	Referencia / Valor
TH1	Termistor NTC	EPCOS B57560G1104F
P3	Conexión al ADC	Pin macho para PCB 2.54mm
R3	Resistencia del divisor de tensión	460ohm

3.6.2.3.3.1 Elección de los componentes

Para la medida de la temperatura se emplea un termistor NTC, una resistencia que disminuye su valor con la temperatura.

La referencia elegida es la EPCOS B57560G1104F, que se eligió por ser un termistor de medida de temperatura hasta los 300°C, que es la temperatura máxima que se espera tener en esta aplicación.

La medida de temperatura se realiza mediante un divisor de tensión, para ello se debe determinar el valor de la segunda resistencia ($460\ \Omega$). Ésta se eligió con un valor tal que en el rango de temperaturas de mayor interés (determinado entre los 150°C y 250°C), el sensor tuviera un comportamiento aproximadamente lineal. También se comprobó que en este rango la resolución del ADC del Arduino (un ADC de 10 bits a 5V, LSB = 0.00488V) permitiera leer siempre un incremento de al menos un grado centígrado.

Ambos criterios se comprueban mediante el cuaderno de iPython NTC_Thermistor, incluido en la sección de anexos a este documento. La curva de calibración del circuito puede consultarse en la Figura 48.

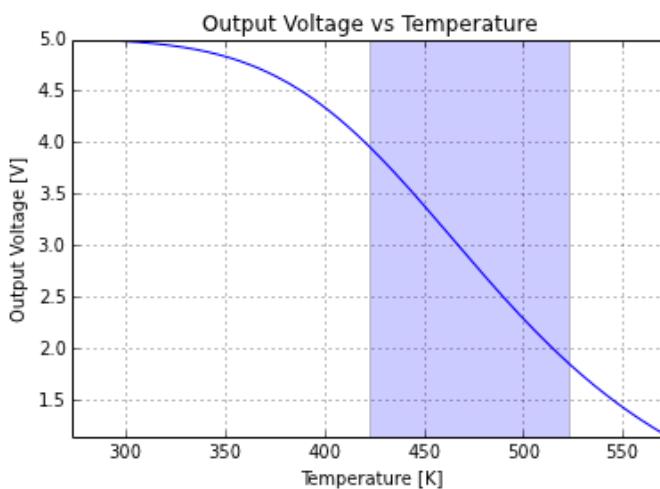


Figura 48 Curva de calibración del circuito del termistor. Se puede ver señalado en un recuadro azul el rango de temperaturas de mayor interés.

3.6.2.3.3.2 Calibración y generación de la tabla de verdad del termistor

La lectura de la temperatura se realiza en el microcontrolador mediante una tabla de verdad. Esta tabla es un array de 1024 posiciones (una por cada uno de los niveles del ADC); en cada una de ellas se encuentra la temperatura que se corresponde a ese nivel.

Dado el tamaño y requerimiento computacional de esta tabla, se hace necesario generarla mediante un proceso automatizado.

La implementación del proceso de generación de la tabla de verdad se ha hecho en el cuaderno de iPython NTC_Termistor. Una captura de la parte correspondiente de este cuaderno se puede ver en la Figura 49.

```
In [17]: print 'double temperature_lut[] = { ',

for i in range(0, 1024) :
    N = i
    V_o_i = N*(5.0/1024.0)
    R_NTC_i = (V_o_i*R)/(V_ref - V_o_i)

    if R_NTC_i > 0 :
        aux1 = ( math.log(R_NTC_i) - math.log(R_0) ) / Beta
        aux2 = 1.0/(T_0)

        T_i = 1.0/( aux1 + aux2 ) #Kelvin
        T_i = T_i - 273.0 #Celsius
        if T_i < 0:
            T_i = 0 #Positions with this error: lut[0] and lut[1023]

        if N < 1023 :
            print '%3.2f,' % (T_i),
        else :
            print '%3.2f' % (T_i),

print '};'

double temperature_lut[] = { 0.00, 2610.01, 1663.15, 1350.86, 1183.96, 1076.29, 999.38, 940.83, 894.26, 856.01, 823.82, 796.23
, 772.19, 751.00, 732.11, 715.12, 699.73, 685.69, 672.80, 660.92, 649.90, 639.66, 630.09, 621.12, 612.69, 604.74, 597.23, 590.1
2, 583.37, 576.95, 570.83, 564.99, 559.41, 554.06, 548.93, 544.01, 539.28, 534.72, 530.33, 526.10, 522.01, 518.06, 514.24, 510.
54, 506.95, 503.47, 500.10, 496.82, 493.64, 490.54, 487.53, 484.60, 481.74, 478.96, 476.24, 473.59, 471.00, 468.48, 466.01, 463
.60, 461.24, 458.93, 456.68, 454.47, 452.30, 450.18, 448.10, 446.06, 444.07, 442.10, 440.18, 438.29, 436.44, 434.62, 432.83, 43
1.07, 429.34, 427.64, 425.97, 424.33, 422.71, 421.12, 419.55, 418.01, 416.49, 415.00, 413.53, 412.07, 410.64, 409.23, 407.85, 4
06.47, 405.12, 403.79, 402.48, 401.18, 399.90, 398.63, 397.39, 396.16, 394.94, 393.74, 392.55, 391.38, 390.22, 389.08, 387.95,
386.83, 385.73, 384.64, 383.56, 382.49, 381.44, 380.39, 379.36, 378.34, 377.33, 376.33, 375.34, 374.36, 373.39, 372.43, 371.49,
```

Figura 49 Captura de pantalla del código de generación de la tabla de verdad del termistor.

Este método se considera adecuado para mantener la zona a una temperatura constante, sin embargo la lectura de la temperatura no se puede considerar completamente fiable por dos razones. La primera es que, al compararla con otros instrumentos (en este caso la sonda de temperatura del multímetro), se ha detectado una desviación en la lectura, que puede atribuirse al valor de la tensión de alimentación del divisor y a la variabilidad de los valores de los propios componentes. La segunda es que al estar colocado en un punto de la superficie exterior del barril, la temperatura leída por el termistor no refleja necesariamente la que hay en la totalidad de la superficie del barril y menos aún la que existe en la interfaz metal-polímero.

3.6.2.3.4 Control de la temperatura

El control de la temperatura del calentador se realiza mediante un algoritmo PID implementado en el microcontrolador, descrito en la página 91.

3.6.2.4 Placa de control de calentadores y ventiladores

Con los diseños electrónicos desarrollados se construyó una placa que permitiera controlar los 3 calentadores y hasta 2 ventiladores (ambos controlados por el mismo transistor, circuito documentado en la página 98). Son los elementos del diseño que funcionan a 24V, junto con el motor.

Para la realización de la placa se eligió una placa de tiras dado el carácter de prototipo del circuito. Una imagen del resultado aparece en la Figura 50.

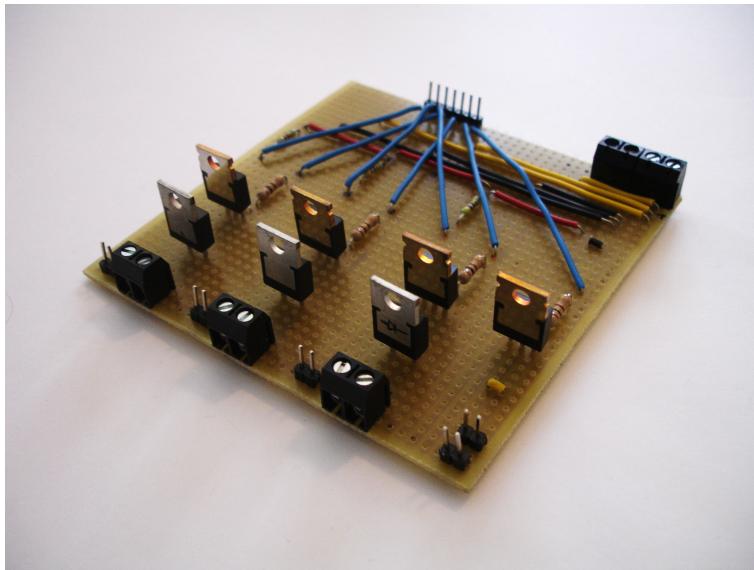


Figura 50 Placa de calentadores y ventiladores

Las entradas de la placa son:

- La alimentación de 24V para los calentadores y ventilador.
- La alimentación de 5V para el circuito del termistor.
- Tierra.
- 1 entrada digital para controlar el estado (ON/OFF) de los ventiladores.
- 3 entradas digitales para controlar por PWM los calentadores.
- 3 salidas analógicas para leer los termistores.

A su vez, los elementos que se conectan a la placa son:

- 3 elementos calentadores a través de clemas.
- 3 termistores a través de pines de paso 2.54mm.
- Uno o dos ventiladores, ambos controlados por el mismo transistor.

3.6.2.5 Pantalla LCD con encoder pulsable

Para el control del modelo final se optó por una pantalla LCD de 20x4 líneas, junto con un encoder rotatorio pulsable como dispositivo de entrada. El tipo de placas que incorporan estos elementos se emplean para controlar impresoras 3D, de manera que están disponibles en numerosas tiendas online. El modelo elegido es RAMPS 1.3/1.4 GADGETS3D Shield with Panel, del fabricante GADGETS3D [41].

Ésta placa se representa en la Pantalla LCD con encoder pulsable Figura 51.

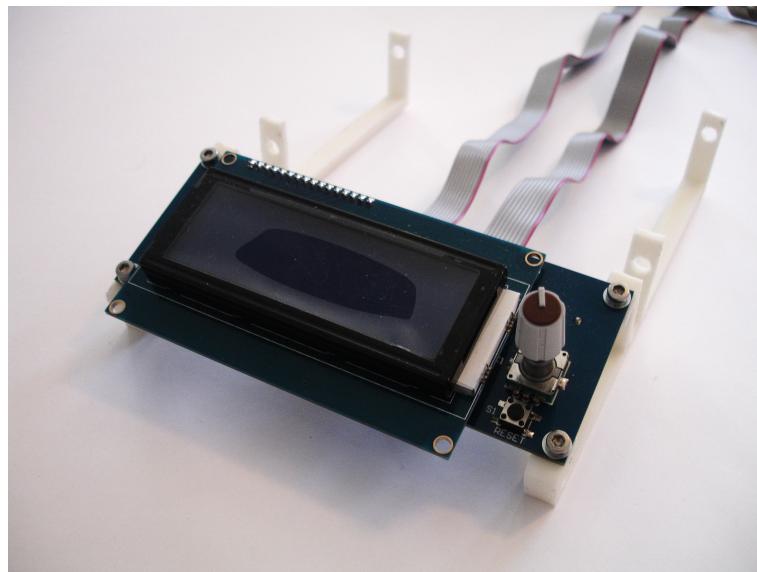


Figura 51 Pantalla LCD y encoder, montado sobre el soporte impreso.

Las capacidades completas de la placa exceden las que han sido implementadas en este proyecto, ya que cuenta con:

- Pantalla LCD de 20x4 líneas.
- Encoder pulsable.
- Zumbador.
- Unidad de lectura/escritura de tarjetas SD.

La presencia de un encoder pulsable hace posible la implementación de una interfaz que permite al usuario modificar el valor de algunas variables del proceso, por ejemplo, la temperatura de las zonas o la velocidad del motor. El movimiento rotatorio del encoder se emplea para navegar por los menús o modificar el valor de las variables, mientras que el pulsador permite seleccionar las variables para editarlas.

La conexión con la placa se realiza mediante dos conectores de 10 pines, por el que también recibe la alimentación. Esta alimentación se obtiene de la salida de 5V de la placa Arduino (conectada al regulador lineal de la placa [42]).

Las conexiones de la placa que se emplean en el proyecto son:

- Alimentación a 5V.
- Alimentación a tierra.
- Entradas del LCD.
 - LCD Enable
 - LCD Register Select
 - Líneas de datos del LCD, del 4 al 7.
- Salidas del encoder.
 - Canal A del encoder.
 - Canal B del encoder.
 - Señal del pulsador del encoder.

3.6.2.6 Escudo de conexiones de la placa

Con el objeto de simplificar el cableado del extrusor se ha empleado una escudo de prototipado sobre el que se han soldado conectores para algunos de los dispositivos electrónicos.

Un escudo de prototipado es una placa que se coloca sobre el Arduino, haciendo conexión con todas sus salidas, y que provee al desarrollador de una superficie de prototipado con nodos eléctricos.

Sobre el escudo se han soldado tomas macho para los dos conectores de 10 pines de la pantalla LCD y para el conector del encoder del motor. Se ha aprovechado también la salida de 5V provista por la placa Arduino para alimentar estos dispositivos. Mediante esta medida se ha conseguido reducir el número de placas de prototipo (*breadboard*) que componen el proyecto, contribuyendo así a la fiabilidad del sistema electrónico.

Una imagen del escudo conectado sobre la placa se puede ver en la Figura 52.

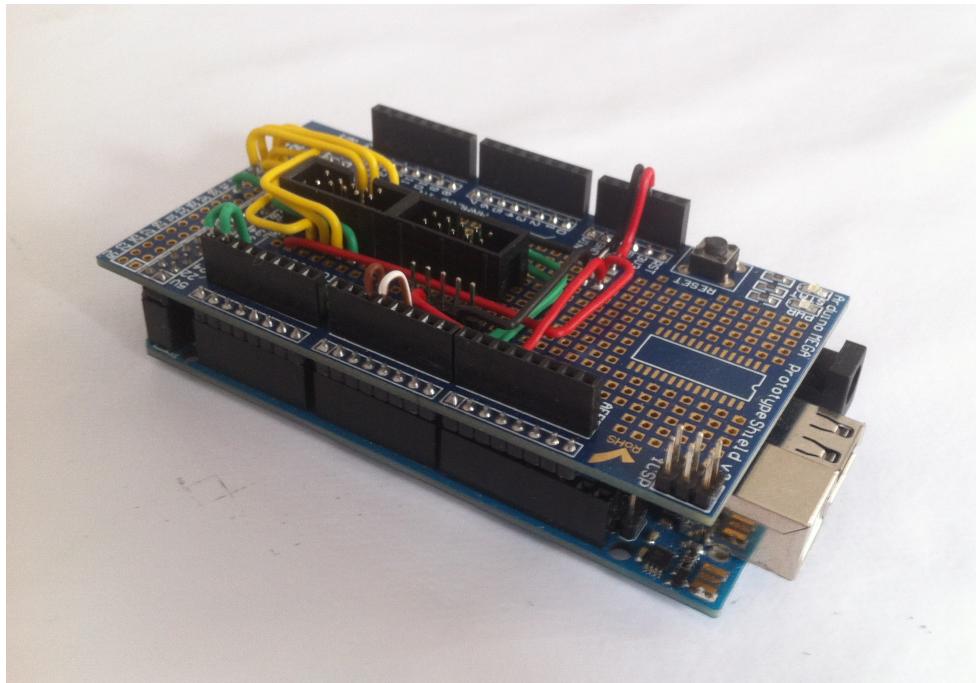


Figura 52 Escudo de conexiones conectado a la placa Arduino Mega.

3.6.2.7 Sistema de potencia

El extrusor definitivo se alimenta mediante una fuente de 24V y 10A, que se muestra en la Figura 53.



Figura 53 Fuente de alimentación.

Las necesidades de alimentación del sistema son las siguientes:

- 24V para el motor y los calentadores.
- 5V para el driver del motor, el encoder óptico, los circuitos de lectura del potenciómetro, el puller y la pantalla LCD.
- 7-12V para la alimentación del Arduino.

El Arduino también se puede alimentar con un USB a 5V, pero se ha decidido emplear la entrada *Vin*, que admite entre 7 y 12V y está conectada al regulador lineal de la placa [36]. Las razones para ello son dos: la primera es que la entrada USB está conectada a un fusible de 500mA, mientras que el regulador lineal de *Vin* puede dar hasta 800mA [42], [43]; la segunda es que la sección del cable de alimentación de un puerto USB es muy reducida. Dado que el encoder y la pantalla se alimentan directamente del Arduino, se ha tenido en cuenta que éste pueda proveer de la máxima intensidad disponible.

El dimensionamiento de la fuente se ha realizado de acuerdo a los resultados obtenidos en el prototipo. Los elementos que más potencia consumen son el motor y los calentadores, 2.2 [35] y 2 (véase Dimensionamiento del elemento calentador) amperios respectivamente. Éstos componentes suman un total de 8.8A, a los que hay que añadir el resto de componentes, de menor consumo: ventiladores, *puller*, pantalla LCD, microcontrolador... Por ello se eligió una fuente de 15A, que pudiera proveer la suficiente potencia con un cierto margen de seguridad.

3.6.2.7.1 Convertidores DC/DC

La diversidad de voltajes de alimentación del sistema hace necesario que además de la fuente de potencia se empleen 2 convertidores DC/DC *step-down*. Éstos transforman los 24V de la fuente a 5 y 12V, para alimentar los componentes del extrusor.

Se eligió un modelo basado en el integrado LM2596 por ser un producto económico que cumplía con los rangos de operación exigidos en esta aplicación. Una imagen del mismo se recoge en la Figura 54.



Figura 54 Convertidor DC/DC basado en el LM2596.

Las especificaciones se ha obtenido de la página web del producto [44], y son:

- Voltaje de entrada: 5 - 35 V
- Voltaje de salida: 1,25 - 30 V
- Corriente máxima de salida: 2A (para alcanzar los 3A se requiere un disipador de calor)
- Dimensiones: 48x23x14 (mm)
- Eficiencia de conversión: hasta 92%
- Frecuencia de conmutación: 150 KHz
- Rectificador: Rectificación asíncrona
- Protección contra cortocircuitos: Limitación de corriente
- Temperatura de funcionamiento: -40 a 85°C (potencia de salida aconsejable menor de 10W)

3.6.3 Software

El control del extrusor se realiza mediante la placa microcontroladora Arduino Mega 2560, que ha sido programada en C/C++.

El software desarrollado para este proyecto se concentra en el programa `Extruder_sketch.ino` (un programa para Arduino), que hace uso extensivo de la librería `Extruder`, desarrollada para poder controlar las funciones del extrusor. Ambos elementos en conjunción son los que hacen posible el control del proyecto, y por ello se exponen sus características en las secciones posteriores.

El código completo puede encontrarse en el repositorio de Github del proyecto [2].

3.6.3.1 Librerías externas empleadas

Como ya se ha mencionado previamente, la elección de la plataforma Arduino permite el acceso a numerosas librerías creadas por la comunidad que simplifican la gestión de los dispositivos electrónicos más comunes.

En este proyecto se ha hecho uso de las siguientes librerías:

- **Encoder.** Esta librería hace posible la lectura de posición de encoders de cuadratura, como los que emplean el motor y la pantalla LCD.
- **PID_v1.** Se trata de una implementación del algoritmo de control PID, que ha permitido el control de la temperatura de los calentadores.
- **LiquidCrystal.** Esta librería se emplea para interactuar con la pantalla LCD.
- **Servo.** Esta librería permite el control de servos de radio-control y servos de rotación continua. Se ha empleado para controlar el puller.

Sin la disponibilidad de estas librerías la magnitud del trabajo de programación del extrusor hubiera estado fuera del alcance de este proyecto. El uso de las mismas ha permitido emplear dispositivos, como la pantalla LCD o los encoders, sin tener que programarlos desde el nivel más bajo.

3.6.3.2 Extruder, librería del extrusor

El código que hace funcionar el extrusor se ha organizado en una librería, programada mediante el paradigma de la programación orientada a objetos, que permite acceder a la funcionalidad de los dispositivos que se emplean en el control del proceso de extrusión. El nombre de ésta librería, tal como aparece en el código del proyecto, es Extruder.

El objetivo de la librería es ofrecer una abstracción del extrusor, para hacer posible escribir software que haga uso de la funcionalidad del mismo.

La programación orientada a objetos puede no ser una técnica que permita la optimización del consumo de los recursos del microprocesador, en comparación con la programación de más bajo nivel en C. Sin embargo, se ha optado a esta opción atendiendo a dos razones: la primera es que la metáfora de objetos y clases se adapta de manera muy natural al sistema físico empleado, donde se pueden crear clases para cada uno de los dispositivos electrónicos del proyecto; la segunda es que en este caso no existía una limitación de los recursos del micro, ya que sólo se ha empleado un pequeño porcentaje de la memoria RAM y Flash del Arduino Mega.

3.6.3.2.1 Clases de la librería

Con la finalidad de modelar los distintos dispositivos del extrusor se han creado las clases que se citan a continuación:

- Extruder (extrusor)
- Heater (calentador)
- Drive (sistema motor)
- Puller
- Thermistor (termistor)

También se emplean algunas clases provistas por librerías externas: Servo, Encoder, LCD y PID.

Las clases y atributos de estas clases se documentan en el diagrama UML que se puede consultar en el anexo 6.3. A continuación, se expone de manera más detallada la función de cada una.

3.6.3.2.1.1 La clase Extruder

La función de la librería Extruder es permitir la instanciación de objetos de la clase Extruder. Ésta clase modela el conjunto de sistemas que se han desarrollado para la línea de extrusión: el extrusor, ventiladores y *puller*, y permite el control de cada uno de ellos.

A continuación se incluye la Figura 55, que muestra las relaciones del resto de clases con Extruder por medio de un diagrama UML simplificado. Obsérvese que todas las demás clases guardan una relación de composición con ella: se modela un sistema que está “compuesto” por elementos más pequeños.

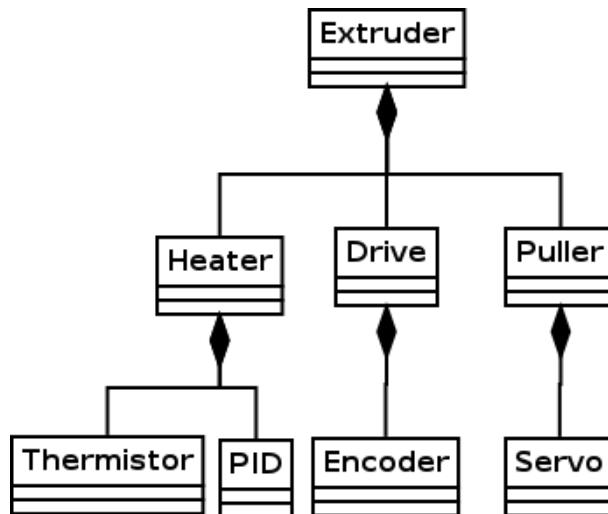


Figura 55 Diagrama UML simplificado de la librería, donde se muestran las relaciones de composición entre clases.

Los métodos de la clase Extruder permiten a un usuario de la librería leer y modificar las variables necesarias para su control: métodos para leer la velocidad del motor, temperatura de los calentadores, estado de los ventiladores (ON/OFF), etc. Además, para controlar el sistema existen métodos de **setup** y **update**:

- El método **setup()** se debe llamar al inicio del programa para realizar la asignación de pines y configuración inicial.
- Los métodos de actualización (**update_heaters()**, **update_drive()**, **update_puller()** y **update_fan()**) gestionan los subsistemas del extrusor en cada una de las iteraciones del bucle principal del programa.

Los atributos y métodos completos de la clase Extruder se pueden consultar en la Figura 56.

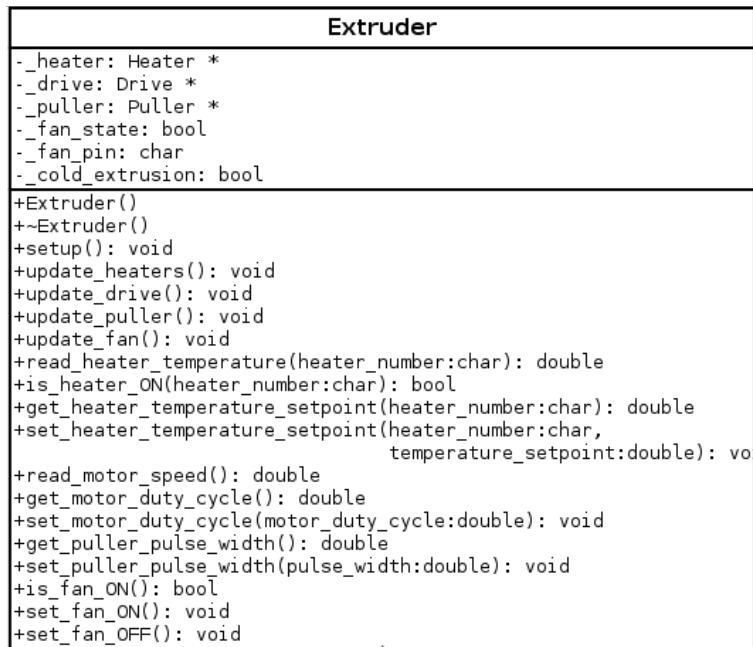


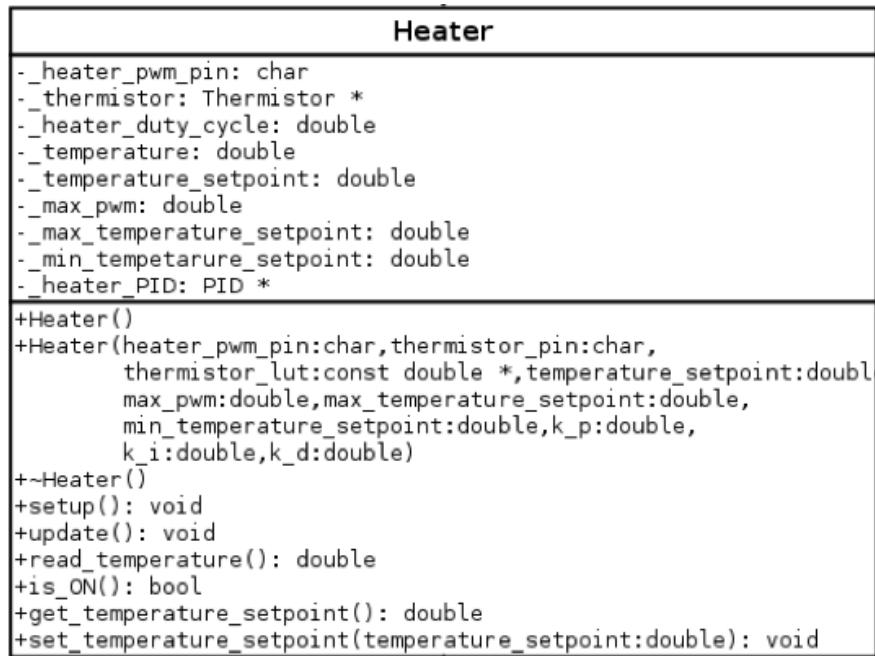
Figura 56 Representación UML de la clase Extruder.

3.6.3.2.1.2 La clase Heater

La clase Heater representa un módulo calentador del extrusor: tanto los componentes físicos como el control PID de la temperatura. Un objeto Extruder cuenta con de 1 a 5 objetos de la clase Heater, para representar la posibilidad de que un extrusor cuente con varios calentadores (como es el caso del modelo desarrollado y de la mayoría de extrusores comerciales).

El control de la zona caliente se realiza en el método update() de la clase. Éste se encarga de leer el termistor, actualizar el PID y generar la señal PWM de los calentadores (mediante la función analogWrite() de Arduino [37]).

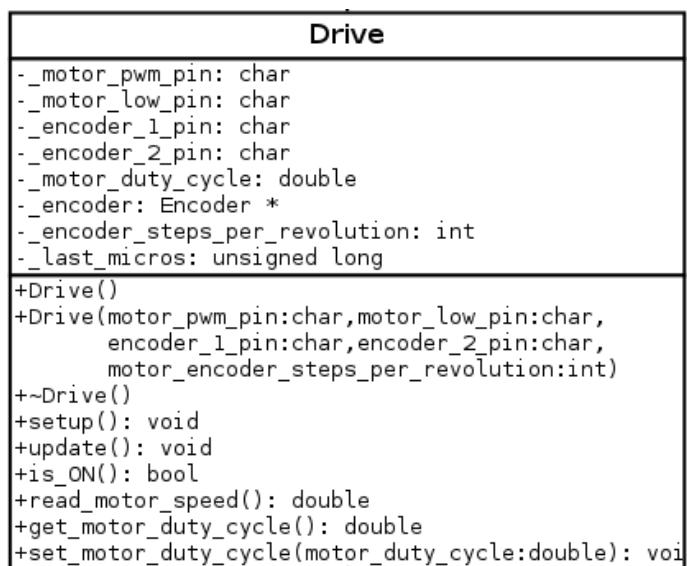
En la Figura 57 se muestra la representación UML de la clase Heater, con sus atributos y métodos completos.

*Figura 57 Representación UML de la clase Heater***3.6.3.2.1.3 La clase Drive**

La clase Drive es la abstracción del sistema motor del extrusor, en este caso compuesto de un motor y un encoder óptico para leer su velocidad.

La funcionalidad que implementa permite dos aspectos fundamentales: leer la velocidad del motor mediante el método `read_motor_speed()` y generar la señal PWM de control del motor (lo que se hace en el método `update()`, por medio de la función `analogWrite()` [37] de Arduino).

La totalidad de los métodos y atributos de la clase Drive se muestran en la Figura 58.

*Figura 58 Representación UML de la clase Drive*

3.6.3.2.1.4 La clase Puller

La clase Puller representa el sistema de recogida del filamento, operado mediante un servo de radio-control de rotación continua.

La función de la clase Puller es generar una señal cuadrada en el pin especificado. La velocidad del servo de rotación continua se controla con este pulso, de modo que se pueda regular la velocidad con la que el plástico abandona la boquilla del extrusor.

Los métodos y atributos de la clase Puller se muestran en la Figura 59.

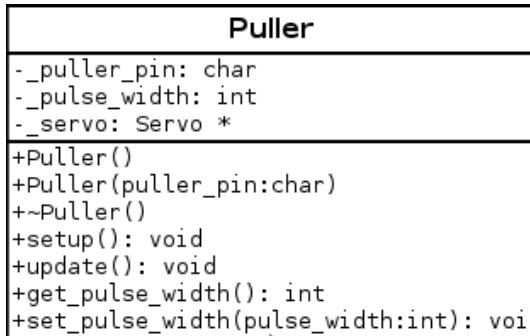


Figura 59 Representación UML de la clase Puller.

3.6.3.2.1.5 La clase Thermistor

La clase Thermistor representa un termistor NTC conectado a uno de los pines del microcontrolador.

La lectura de la temperatura se realiza por medio de una tabla de verdad, como ya se ha expuesto en el epígrafe Calibración y generación de la tabla de verdad del termistor.

Los atributos y métodos de esta clase se muestran en la Figura 60.

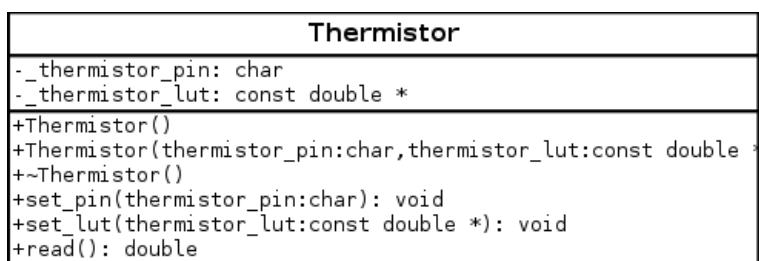


Figura 60 Representación UML de la clase Thermistor.

3.6.3.2.1.6 Las clases externas: PID, Encoder y Servo

Las clases PID, Encoder y Servo se han obtenido de librerías externas desarrolladas por la comunidad de Arduino. La documentación de cada una de ellas puede obtenerse en las entradas de la bibliografía [45], [46] y [47], respectivamente.

De manera general, el uso que se le ha dado a cada una de ellas es:

- **PID.** Permite la instanciación de objetos PID, mediante el uso de tres variables: input, output y setpoint. El controlador se actualiza cada 200 ms, lo que es suficiente para el control de las temperaturas que se realiza en este sistema. Los parámetros

del algoritmo (k_P , k_I , k_D) se ajustaron manualmente hasta obtener el comportamiento deseado.

- **Encoder.** Permite la lectura de la posición de un encoder de cuadratura; se emplea para calcular la velocidad del motor.
- **Servo.** Permite la generación de la señal de control de un servo. Se emplea para controlar la velocidad del *puller*, cuyo motor es un servo de rotación continua.

Las figuras Figura 61, Figura 62 y Figura 63 muestran la representación UML de estas tres clases. En ellas sólo se ha incluido los métodos de los que se hace uso en este proyecto, ya que existen otros muchos métodos y atributos que no tienen relevancia específica para la librería Extruder.

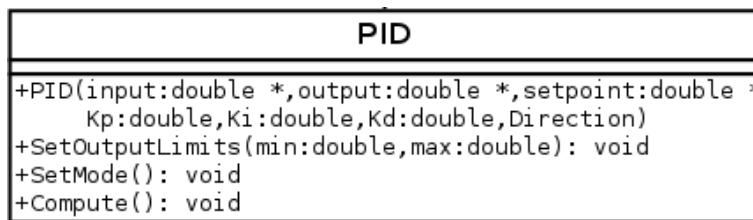


Figura 61 Representación UML de la clase PID.

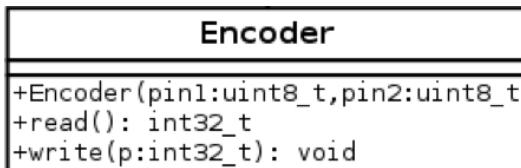


Figura 62 Representación UML de la clase Encoder.

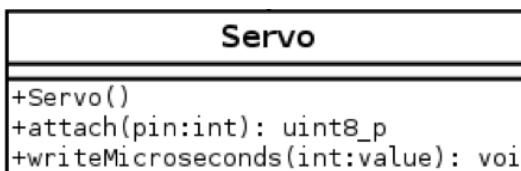


Figura 63 Representación UML de la clase Servo.

3.6.3.2.1.7 Archivo de configuración

La configuración del extrusor se realiza mediante la modificación de una serie de valores que contienen los parámetros más relevantes de funcionamiento: pines del microcontrolador, temperaturas iniciales, valores máximos, mínimos, etc. La definición de estos parámetros se realiza mediante la directiva `#define`.

Todos los valores de configuración del extrusor se han reunido en un único archivo, Configuration.h, donde también se documenta el uso de cada uno de ellos. El mismo se

puede consultar en el repositorio online del proyecto, [2]. Un fragmento de este archivo, a modo de ejemplo, se muestra en la Figura 64.

```

58
59  ****
60  * Heater configuration
61  ****
62
63 #define NUMBER_OF_HEATERS 3 //library supports by default up to 5 heaters
64
65 //Constants used to prevent cold extrusion
66 #define MELTING_HEATERS 1           //Number of heaters, starting from (and includ
67 #define MELTING_TEMPERATURE 150     //If the melting heaters are below this temper
68
69 //Heater PWM limit (used to limit the power of the heaters)
70 #define HEATER_MAX_PWM 0.8 //value from 0 to 1
71
72 //Maximum and minimum heater temperatures
73 #define HEATER_MAX_TEMPERATURE 300 //Celsius
74 #define HEATER_MIN_TEMPERATURE 0   //Celsius
75
76 //Heater initial temperature setpoints
77 //Numbering criteria: heater 1 is the one nearest the die, heater 5 is the farthest.
78 #define HEATER_1_SETPOINT 60
79 #define HEATER_2_SETPOINT 60
80 #define HEATER_3_SETPOINT 60

```

Figura 64 Fragmento del archivo de configuración del extrusor, Configuration.h

3.6.3.3 Lógica de control del programa

El programa de control del extrusor y la pantalla LCD está reunido en el archivo Extruder_Sketch.ino (consultar en [2]). El formato .ino es el formato propio de Arduino, se trata de un archivo escrito en C/C++. La denominación de *sketch* es el término que emplea la plataforma Arduino para referirse a los programas escritos para este microcontrolador.

Este programa hace uso de la librería Extruder, necesaria para controlar el extrusor y acceder a sus variables más relevantes (véase Extruder, librería del extrusor).

El sistema Arduino provee de paradigma de programación similar al que se emplea en otros microcontroladores, con un bloque inicial de configuración (en este caso la función `setup()`) y un bucle que se repite continuamente (la función `loop()`). Un diagrama de flujo que ilustra estas dos funciones se muestra en la Figura 65.

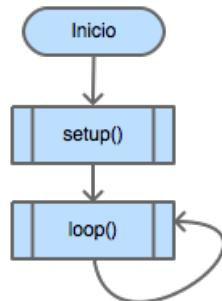
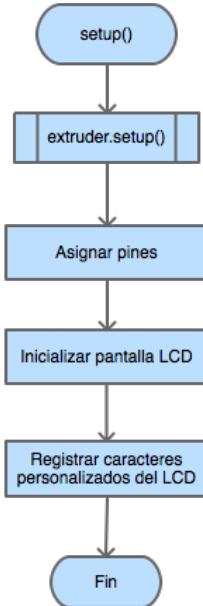
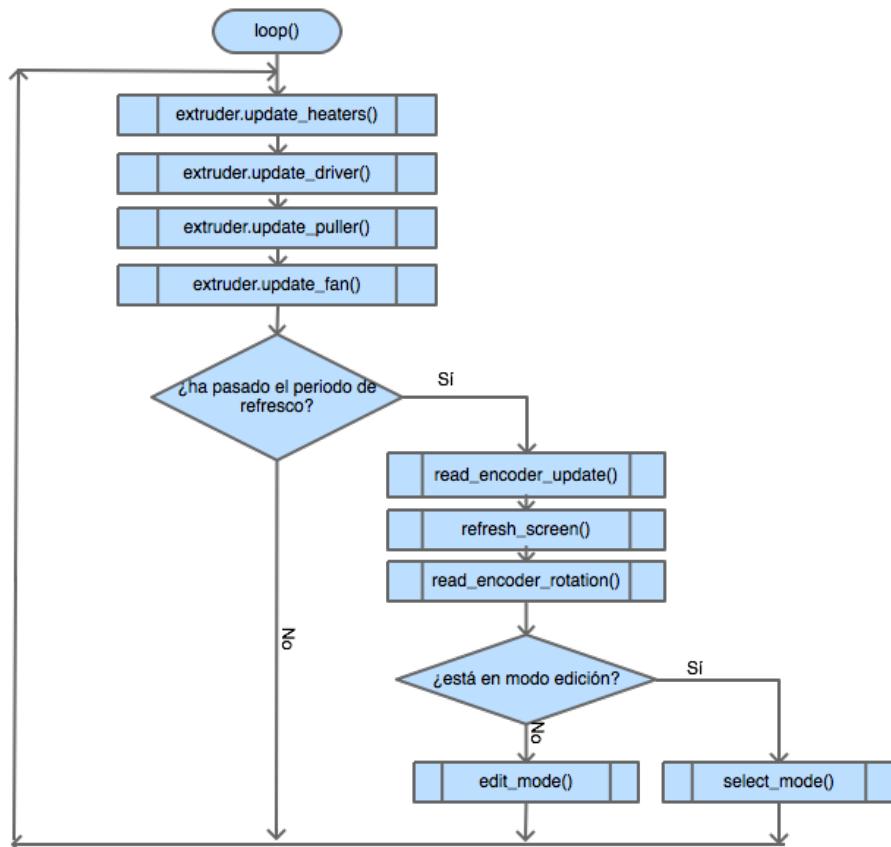


Figura 65 Diagrama de flujo de un sketch de Arduino.

El diagrama de flujo del código que se ejecuta en la función `setup()` aparece en la Figura 66.

*Figura 66 Diagrama de flujo de la función `setup()`.*

El diagrama de flujo del código que se ejecuta en la función `loop()`, es decir, en el bucle principal, se muestra en la Figura 67.

*Figura 67 Diagrama de flujo de la función `loop()`.*

3.6.3.4 Interfaz de usuario

En esta sección se presenta la interfaz de usuario que se ha desarrollado para el extrusor, por medio de la ya mencionada pantalla LCD con encoder pulsable (véase página 82). Una imagen de la pantalla se puede ver en la Figura 68.

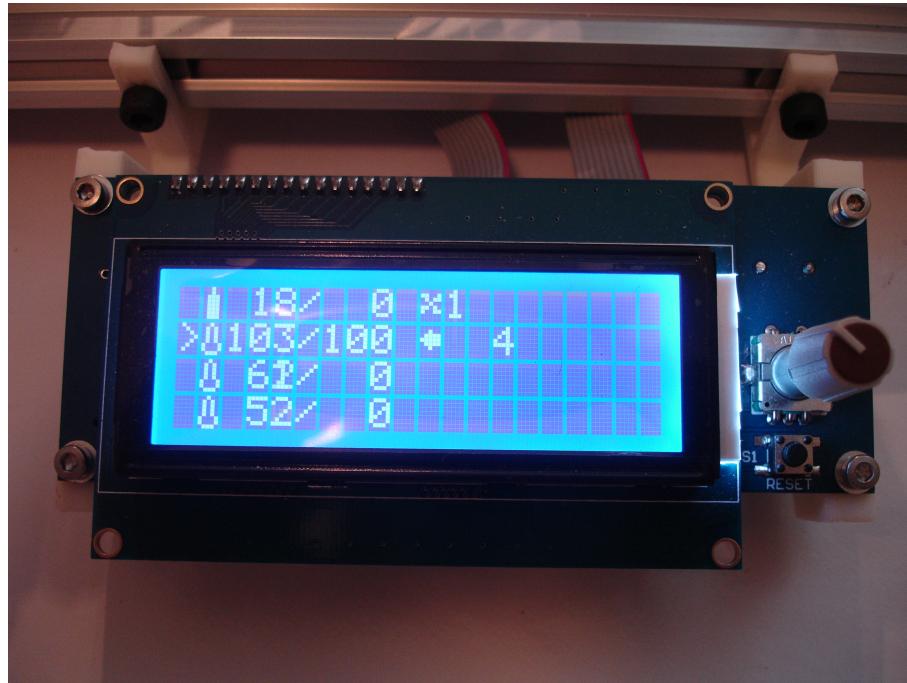


Figura 68 Imagen de la interfaz con pantalla LCD y encoder pulsable.

3.6.3.4.1 Elementos de la interfaz

Los datos que se muestran en la pantalla se distribuyen en dos columnas. A continuación se detalla el significado de cada una de las variables representadas, empezando por la primera columna, de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha:

- Datos del motor
 - Velocidad del motor, en revoluciones por minuto
 - Ciclo de trabajo del motor, de 0 a 100.
- Datos del calentador 1
 - Temperatura del calentador 1
 - Temperatura de consigna 1
- Datos del calentador 2
 - Temperatura del calentador 2
 - Temperatura de consigna 2
- Datos del calentador 3
 - Temperatura del calentador 3
 - Temperatura de consigna 3
- Estado del ventilador (0 para apagado y 1 para encendido)
- Ancho de pulso de la señal del *puller*, que determina la velocidad de recogida del filamento.

Para representar cada uno de los componentes expuestos se emplea un carácter personalizado, a modo de ícono: un motor, un termómetro, un ventilador y una flecha para el *puller*. En el caso de los calentadores, éste ícono también ofrece información del estado del extrusor, ya que el extrusor aparece “relleno” si el elemento calefactor está conectado.

3.6.3.4.2 Interacción con el usuario

El usuario interactúa con esta interfaz a través de un encoder pulsable. Éste reconoce el movimiento de rotación, así como si el usuario lo está pulsando.

El encoder permite al usuario dos comportamientos: selección del menú y edición de variables:

- La **selección del menú** se realiza mediante el cursor (carácter >), que se desplaza por cada uno de los menús (motor, calentadores, ventilador...) con el movimiento de rotación del encoder.
- La **edición de variables** se realiza cuando el usuario pulsa el encoder sobre un menú seleccionado. Así se accede a la edición de la variable correspondiente a ese menú (por ejemplo, el ciclo de trabajo en el caso del motor o la temperatura de consigna en los calentadores). El modo de edición se ve reflejado en la interfaz por medio del cursor, que cambia del carácter de selección (carácter >) al de edición (carácter #). En este modo el movimiento de rotación del encoder incrementa o decremente el valor de la variable. Una nueva pulsación devuelve el sistema al modo de selección.

3.6.4 Línea de extrusión

Además del propio extrusor, se han desarrollado algunos otros componentes de la línea de extrusión; elementos que se fijan al raíl de aluminio y completan las siguientes fases del proceso de extrusión.

3.6.4.1 Puller

El *puller* es el componente de la línea de extrusión que se encarga de tirar del filamento para que el material salga de la boquilla del extrusor a un ritmo constante. El *puller* desarrollado para este proyecto es el que se muestra en la Figura 69.

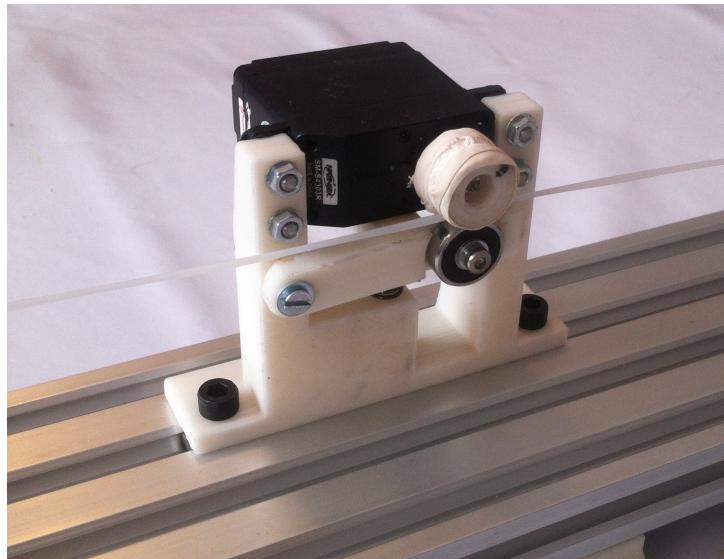


Figura 69 Puller.

El *puller* es un elemento determinante para la calidad del filamento extruido, ya que la estabilidad del diámetro del filamento depende en gran medida de que la velocidad con la que se extrae el filamento del extrusor sea constante.

El motor que se encarga de mover el *puller* es un servo de rotación continua. Las razones para elegir este motor han sido:

- La velocidad es regulable mediante una señal cuadrada de 5V, sin necesidad de un driver externo.
- El servo incorpora una reductora, con lo que puede entregar el par necesario para tirar del filamento.
- La alimentación del motor también se realiza a 5V, compartiendo nivel de tensión con otros elementos del diseño.
- Amplia disponibilidad en tiendas físicas y online.

El funcionamiento del *puller* es simple: el eje del motor tiene acoplada una rueda cubierta de material elástico, mientras un rodamiento de bolas presiona el filamento contra esta rueda; así, la rotación de la rueda tira del filamento y lo extrae del extrusor a un ritmo controlado. El mecanismo que empuja el rodamiento es una palanca, accionada por un muelle, y cuyo punto de apoyo está fijado en la estructura que soporta el motor.

3.6.4.2 Sistema de refrigeración

El plástico abandona el extrusor a una temperatura elevada, es necesario enfriarlo para que pueda pasar por el *puller*.

El sistema de refrigeración del extrusor está compuesto por dos ventiladores de 24V, que se fijan al raíl mediante piezas impresas, como se muestra en la Figura 70.

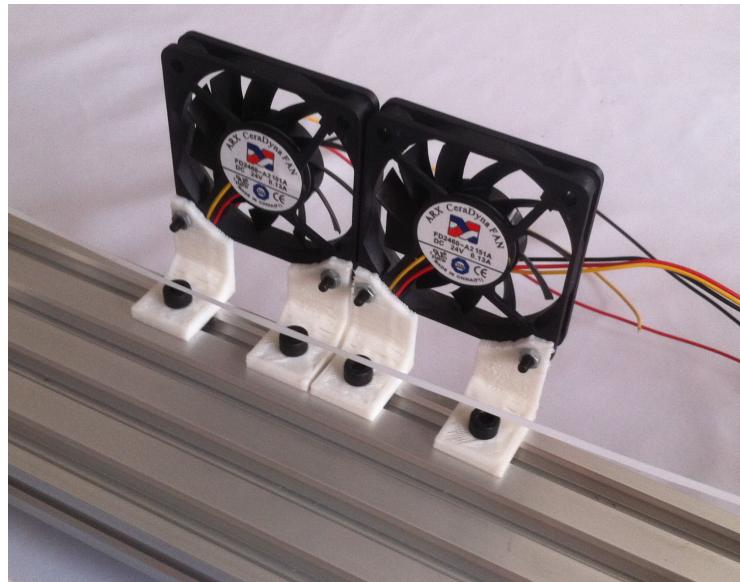


Figura 70 Sistema de refrigeración.

El control de los ventiladores se realiza mediante el circuito descrito en la siguiente sección, que está integrado en la placa de control de los calentadores (véase página 81).

3.6.4.3 Control de los ventiladores

El control de los ventiladores se realiza con un circuito de conmutación muy similar al empleado para los calentadores, que se puede consultar en la Figura 71. Los componentes elegidos se muestran en la Tabla 15.

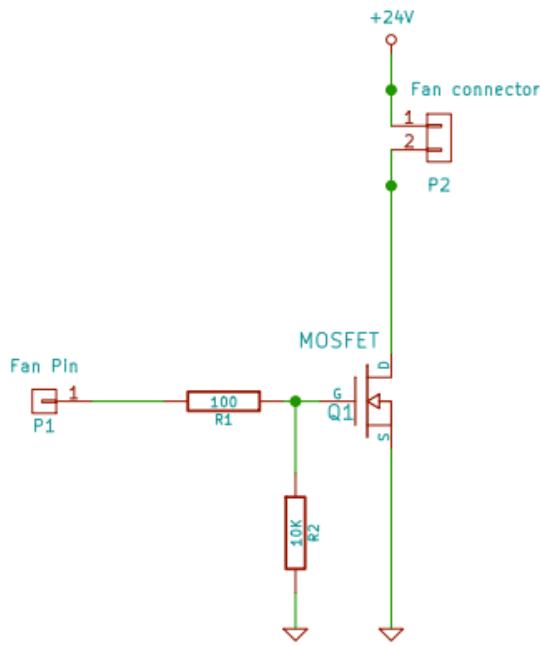


Figura 71 Circuito de control de los ventiladores.

Tabla 15 Componentes del circuito de control de los ventiladores.

Componente	Descripción	Referencia / Valor
Q1	MOSFET de canal N y nivel lógico	IRL540N
P1	Conexión al pin del ventilador	Pin macho para PCB 2.54mm
P2	Conexión al ventilador	2xPin macho para PCB 2.54mm
R1	Resistencia limitadora de corriente	100ohm
R2	Resistencia de pull-down	10Kohm

3.6.4.3.1 Elección de los componentes

La elección de los componentes del circuito se hizo de acuerdo a los mismo criterios expuestos anteriormente para el circuito del calentador (véase página 78).

3.6.4.4 Guías de filamento

Para reducir las oscilaciones que sufre el filamento al abandonar el extrusor, se diseñaron unas guías impresas, que se atornillan al perfil de aluminio y restringen el movimiento del filamento. Se pueden ver en la Figura 72.



Figura 72 Guía de filamento.

3.7 Análisis de costes

En este apartado se analiza el coste del extrusor desde diferentes puntos de vista: materiales, desarrollo y coste unitario.

3.7.1 Coste de materiales

En los objetivos del proyecto se especifica que el coste máximo de los materiales del extrusor es de 500€. Las razones por las que se ha elegido el coste de los materiales, en vez de el coste total (incluyendo horas de desarrollo, montaje, amortización, etc.) son dos: la primera es que se trata de la cifra más objetiva para una especificación, ya que no depende de aspectos como la valoración unitaria de las horas de trabajo, herramientas, costes de bienes no utilizados, etc; la segunda razón es que es la cantidad que más significado tiene para un usuario que quiera reproducir el diseño (lo que es el caso más común en un proyecto open source), sobre el que no repercuten los costes de desarrollo o que no pone un precio a sus horas de trabajo (al tratarse de una afición).

Si se consulta la lista de materiales del extrusor, que se incluye en el Anexo 0, se puede comprobar que el coste total de las piezas del extrusor es de 375.00€.

Para la elaboración de la lista de materiales se ha empleado el coste unitario de cada uno de los componentes en los proveedores en los que se han adquirido (tiendas físicas y online). Es importante destacar que en el caso de las tiendas online, además del coste de la pieza, se ha de considerar el coste del manejo, envío y aduanas, que puede ser del mismo orden que el coste del propio producto.

3.7.2 Coste de desarrollo

El coste de desarrollo del producto se calculará con los costes en los que se ha incurrido durante el desarrollo del producto, teniendo en cuenta los materiales adquiridos y las horas

empleadas. Al ser un proyecto desarrollado sobre herramientas open source no es necesario considerar gastos de licencias. En un proyecto comercial, el coste de desarrollo que aquí presenta debería ser amortizado en cada una de las unidades que se vayan a producir.

Se han considerado:

- **Costes de material durante el proceso de desarrollo**, que representan los gastos en piezas para el extrusor y algunos productos fungibles necesarios, como la granza, acetona, etc. No se han considerado costes de las herramientas ya que no se ha necesitado adquirir herramientas para la construcción del proyecto. La cantidad asciende a 1042.93 €. La razón de que esta cantidad sea varias veces el coste de materiales de un extrusor es que incluye otros conceptos como gastos de envío, manipulación, aduanas, etc. y que para muchos componentes se adquirieron más unidades de las incluidas en el proyecto para asegurar su disponibilidad.
- **Coste horario del proceso de desarrollo**. Para este coste se considera una estimación de las horas que se han invertido en el proyecto, atendiendo a la sección en la que se expone la planificación: Fases del desarrollo del extrusor. Dado que la dedicación al proyecto ha variado a lo largo de las diferentes fases, se asignan una cantidad de horas semanales a cada una:
 - Estudio del problema y dimensionamiento de los componentes principales: 5h/semana.
 - Desarrollo del prototipo inicial: 20h/semana
 - Desarrollo del modelo final: 20h/semana
 - Redacción de la memoria: No se considera ya que no pertenece al desarrollo del propio modelo, sino a la documentación del proceso.

El total resultante, considerando 4 semanas por cada mes de la planificación, es de 380 horas.

El coste asignado a cada hora es de desarrollo es de 25€.

Se calcula el coste de desarrollo, considerando los datos expuestos:

Coste de materiales	1 042.93 €
Salario	500h · 25 €/h = 9 500.00 €
Total	10 542.93 €

El coste total del desarrollo es de 10 542.93 €.

3.7.3 Coste unitario del producto

En este apartado se ha calculado el coste del producto, incluyendo el coste de materiales, el coste de aprovisionamiento de los mismos y las horas de montaje del producto. Sin embargo, no se han considerado otros costes que dependen del número de unidades producidas, como el coste de desarrollo unitario o amortizaciones.

La razón de proveer de este coste es que es una medida representativa del coste real de cada extrusor. A diferencia del coste de materiales, en este caso se valora el coste que suponen los

gastos de envío, manejo y aduanas (aprovisionamiento) y se incluye una estimación de las horas que se emplearían en el montaje de una unidad:

- Dado que no existen datos individualizados de gastos de envío para cada componente (ya que este dato se ofrece por pedido, no por producto), se han estimado unos costes de aprovisionamiento de un tercio del coste del producto. Esto se corresponde con la experiencia reunida durante el desarrollo del presente proyecto.
- Las horas de montaje de una unidad se han estimado, intentando reflejar el tiempo que tardaría una persona en imprimir las construir y montar todos los sistemas del extrusor. Se estima que se puede construir en 5 jornadas de 4 horas, un total de 20h.
- El coste horario considerado es de 25 €.

El resultado se desarrolla a continuación:

Coste de materiales		375.00 €
Coste de aprovisionamiento	$\frac{1}{3} \cdot 375 \text{ €} =$	125.00 €
Salario	$20 \text{ h} \cdot 25 \text{ €/h} =$	500.00 €
Total		1 000.00 €

Obteniéndose un coste de 1 000 € por extrusor.

3.8 Evaluación del modelo final

El modelo final incorpora las mejoras propuestas para el prototipo, dando lugar a un extrusor más integrado en la parte mecánica, electrónica y que aprovecha toda la capacidad del motor al alimentarlo a 24V. Así mismo, la nueva interfaz de usuario y software de control significan una mejora sustancial sobre el modelo anterior.

Este modelo mejorado se ha empleado para realizar varias pruebas de extrusión, a partir de las cuales se ha podido determinar la calidad del filamento que produce y la viabilidad de éste para ser empleado en una impresora 3D. La discusión de estas pruebas se realiza en los dos siguientes apartados.

3.8.1 Prueba de extrusión

Para evaluar la calidad del filamento producido por el extrusor, se realizaron varias pruebas de funcionamiento, y se evaluó la calidad del filamento mediante el método descrito en la sección Procedimiento para medir el filamento.

Se realizaron un total de 8 pruebas, en diferentes condiciones, obteniéndose los resultados de:

- El diámetro medio se pudo ajustar ligeramente por debajo de los 3mm, de manera similar al filamento comercial (véase página 36), por medio del control de la velocidad del puller.
- La tolerancia obtenida dista mucho de la del filamento comercial ($\pm 0.1\text{mm}$, véase página 36), siendo el mejor resultado un rango de tolerancia de amplitud 0,9mm (lo que equivaldría a $\pm 0.45\text{mm}$). El mejor resultado de calidad sobre el diámetro medio que se ha registrado es de $2.59 \pm 0.49\text{ mm}$.
- La capacidad máxima del extrusor durante las pruebas, alcanzada a 36 revoluciones por minuto, es de 0,4kg por hora, lo que cumple con el objetivo especificado al inicio del proyecto.
- Ninguna de las pruebas mostró defectos visuales: quemaduras, burbujas externas, etc.

Como se puede comprobar, los resultados de tolerancia del modelo final han resultado lejanos a la tolerancia del filamento comercial. Además, han resultado peores que los resultados obtenidos de las pruebas del prototipo, donde la mejor tolerancia era de $\pm 0.31\text{mm}$.

Se ha observado fluctuación importantes del caudal del extrusor (detectables a simple vista), con un periodo del orden de los 30 segundos hasta el minuto. Al consultar la bibliografía ([4], página 533 a 535), esta inestabilidad se atribuye a fluctuaciones en la temperatura del fluido. Se considera una causa posible, ya que el que la temperatura en el sensor (situado en la superficie externa del barril) sea constante no implica necesariamente que la temperatura del fluido lo sea también. Además, los ciclos de encendido/apagado de los elementos calefactores puede alterar la temperatura del fluido de manera cíclica. Sin embargo se debe hacer notar que en el modelo final la temperatura se mantuvo en un rango de control más estrecho que en el prototipo, por lo que no se considera una explicación concluyente.

Otra explicación puede venir de los cambios que se han realizado en el diseño. La mayoría de elementos de los que depende la calidad del extruido han permanecido inalterados desde el prototipo al modelo final, ya que se trata de los elementos más básicos: husillo, barril y motor. Sin embargo, el modelo final cuenta con tres zonas calientes, en vez de la única zona del prototipo.

A priori la incorporación de más bandas de temperatura debería haber mejorado la calidad del filamento, ya que una zona de fundido más larga disminuye la sensibilidad a los cambios de presión (al disminuir el gradiente de presión, consultar página 29), y con ello aumenta la estabilidad del producto extruido. Sin embargo, se puede haber producido el efecto contrario, debido a la aparición de atascos en la zona fundida.

El diseño del prototipo producía una rápida transición entre la zona fría y la zona caliente, en la que el plástico se funde. El modelo final, por el contrario, calienta gradualmente el polímero al hacerlo pasar por las diferentes bandas. Esta segunda configuración es menos deseable si se considera el comportamiento del polímero fundiéndose: entre la temperatura de transición vítrea y la de fusión [15] existe un amplio intervalo en el que el plástico se fluidiza. En este intervalo de temperaturas el polímero es propenso a producir atascos. Las diferencias locales de temperatura (por ejemplo, temperaturas altas en la pared interior del

barril) también pueden producir la adherencia de gránulos de material y producir atascos, teniendo un efecto negativo sobre la calidad del filamento.

En resumen, las fluctuaciones de baja frecuencia que se han detectado han afectado de manera muy significativa a la calidad del filamento del modelo final, atribuyéndose las mismas a dos posibles causas: diferencias de temperatura dentro del fluido (debido al sistema de control de temperatura) o a atascos puntuales producidos en la zona caliente del extrusor.

3.8.2 Pruebas de impresión

Se pretende evaluar la funcionalidad del filamento extruido por el modelo final, es decir, si es capaz de ser extruido por una impresora 3D sin causar problemas y dando lugar a piezas adecuadas.

Para ello se han impreso un semicubo de calibración en una impresora RepRap, modelo Prusa Air 2 [48] y con fusor de filamento J-Head [49]. La Figura 73 muestra el semicubo impreso con el filamento fabricado con el extrusor del proyecto, junto con otra pieza de control hecha a partir de filamento comercial.

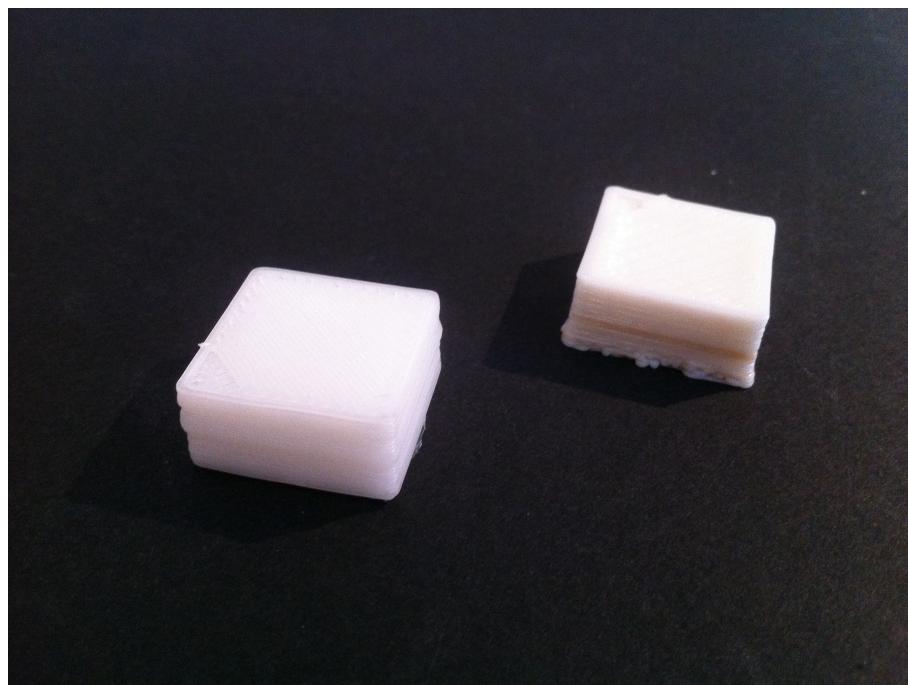


Figura 73 Semicubo de calibración impreso con filamento extruido con el extrusor (primer plano) y semicubo de control.

Otras de las piezas que fueron impresas para comprobar la funcionalidad del filamento se muestran en la Figura 74 y Figura 75, junto a sus correspondientes piezas de control de filamento comercial.

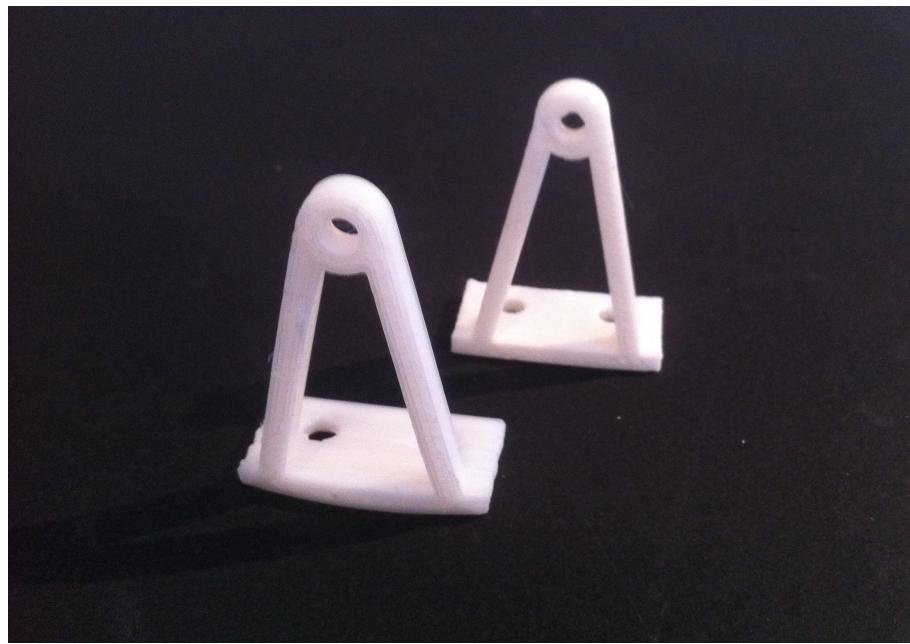


Figura 74 Guía de filamento impresa con filamento extruido con el extrusor (primer plano) y pieza de control.

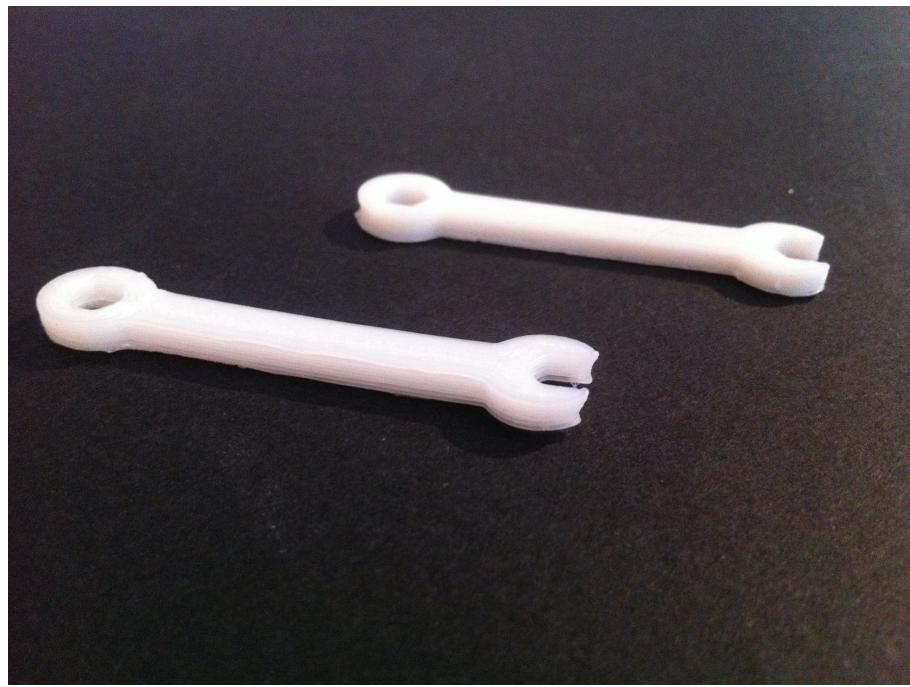


Figura 75 Llave fija impresa con filamento extruido con el extrusor (primer plano) y pieza de control.

Con estas pruebas se comprobó que el filamento extruido durante la realización de este proyecto es funcional y puede emplearse de la misma manera que uno comercial en una impresora 3D.

4 Conclusiones

En esta sección se valora el trabajo realizado en este proyecto y especialmente el resultado final.

En primer lugar, se presenta un resumen de las características técnicas de la solución desarrollada. Posteriormente, se discutirá el cumplimiento de los objetivos establecidos al inicio del proceso, se comparará el diseño final con otras soluciones existentes y se propondrán una serie de mejoras sobre el mismo. Por último, se expone brevemente una valoración final de todo el proyecto.

4.1 Resumen de características del extrusor

El modelo desarrollado es un extrusor de filamento de bajo coste. En las pruebas realizadas se ha documentado su capacidad para producir filamento de ABS funcional, con una caudal de 0.40 kg/h (un kilogramo cada 2.5h) y una tolerancia de hasta ± 0.49 mm.

Las funcionalidades que incorpora son:

- Motor con velocidad regulable.
- Tres zonas de control de temperatura independientes.
- Diseño modular, montado sobre un raíl de aluminio extruido.
- Control implementado en una placa controladora Arduino, con lo que todas las funciones son programables.
- Interfaz implementada en una pantalla LCD con control por medio de un encoder pulsable.
- Sistema de extracción (*puller*) de velocidad variable, que permite la fabricación de filamento de diferentes diámetros.
- Desarrollo de un sistema de refrigeración por aire, controlado por el usuario mediante la interfaz.

El resultado final del proyecto puede observarse en las figuras de la Figura 76 a la Figura 85.

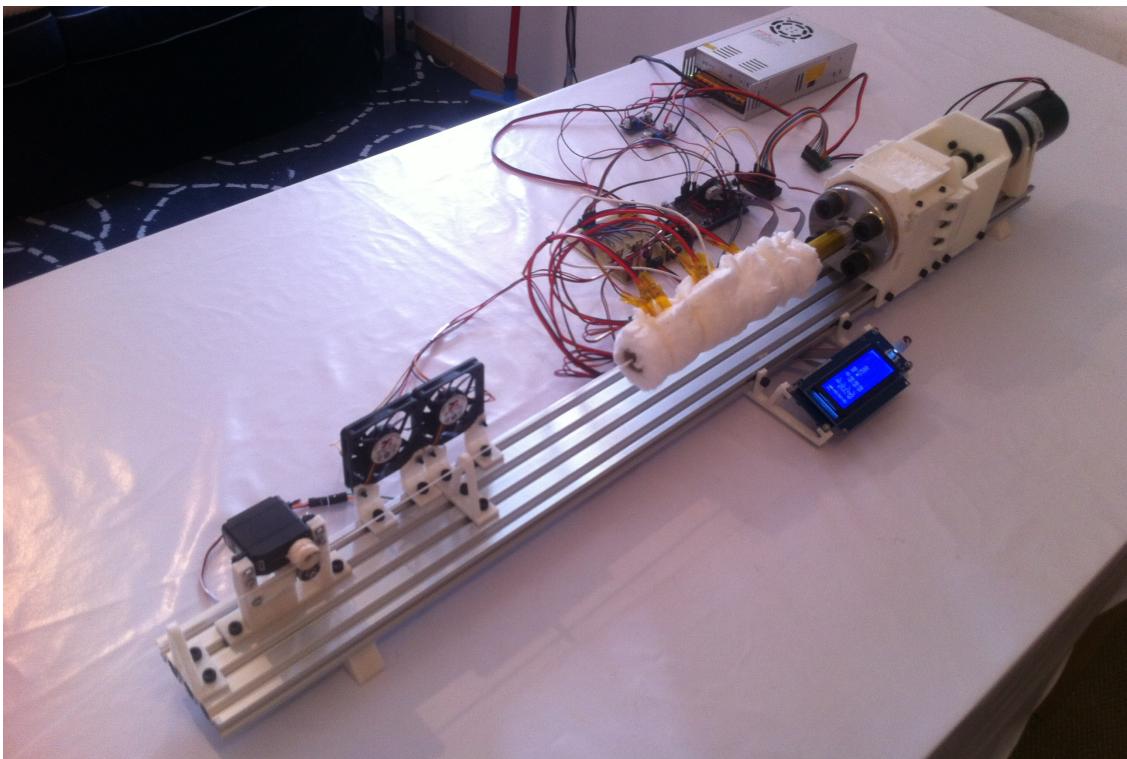


Figura 76 Línea de extrusión

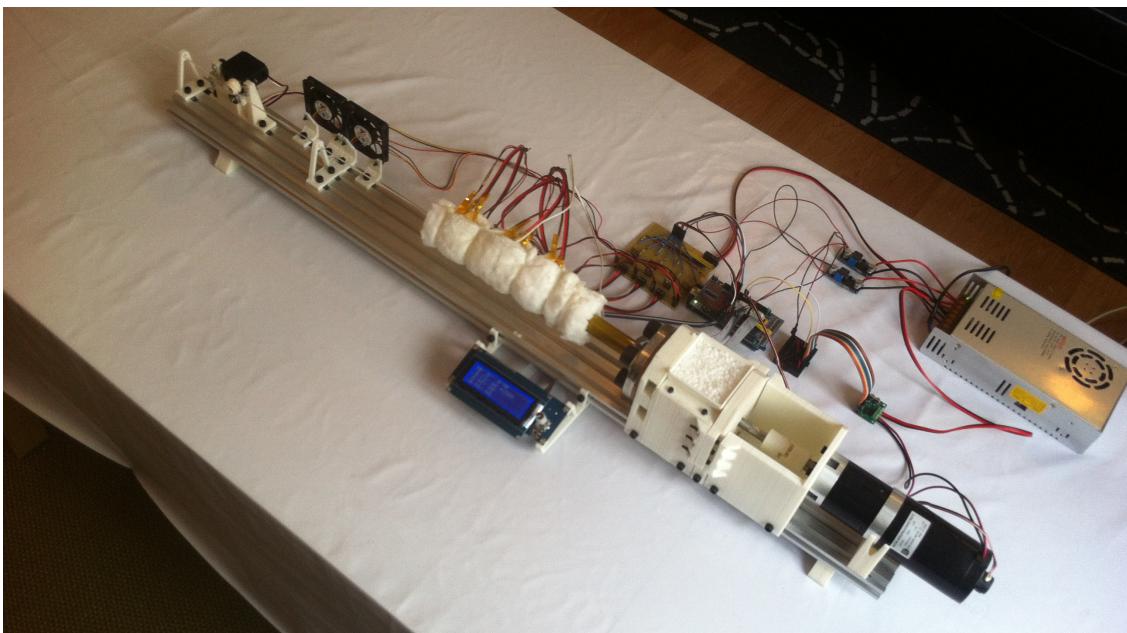


Figura 77 Línea de extrusión

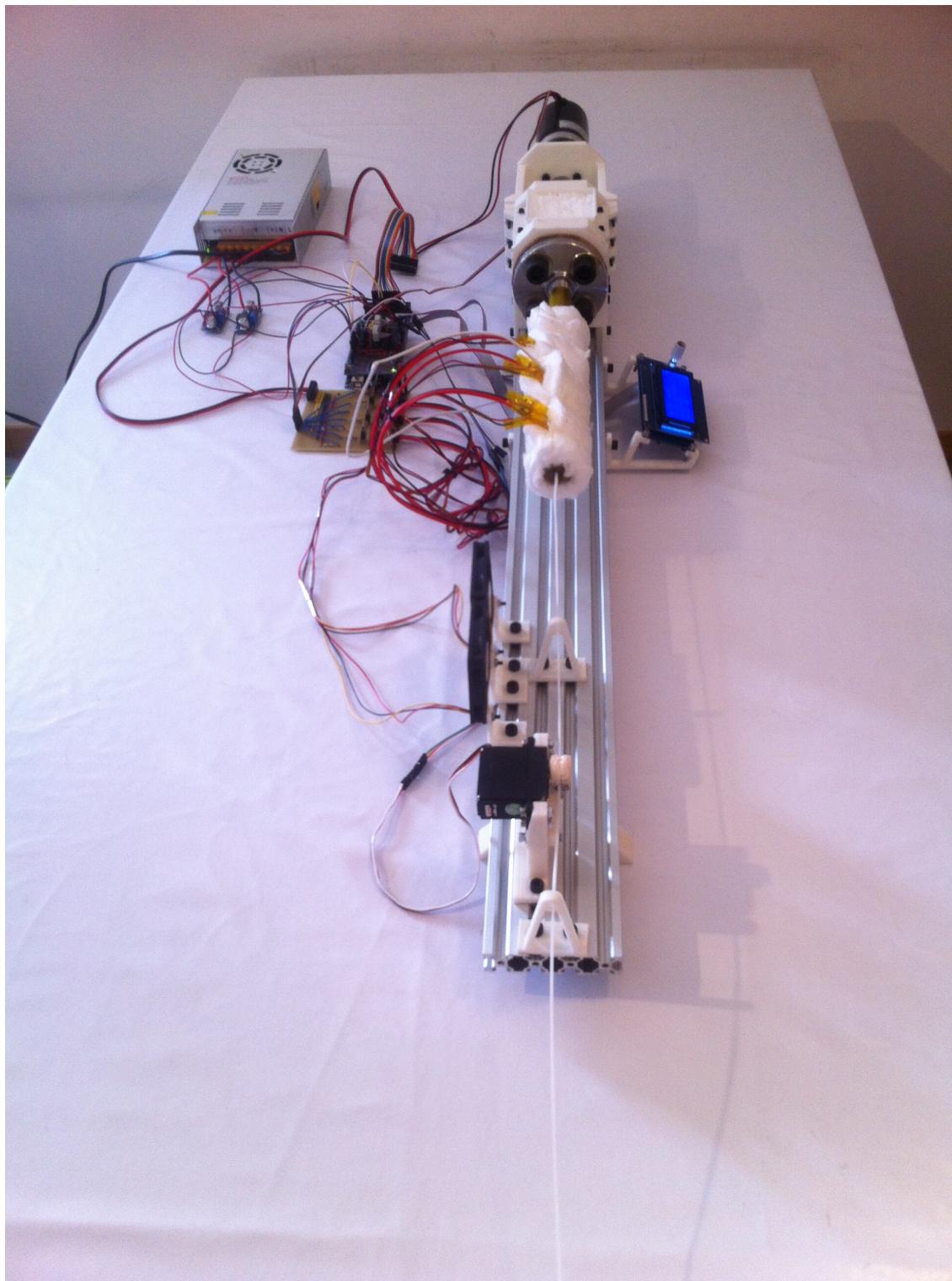


Figura 78 Línea de extrusión

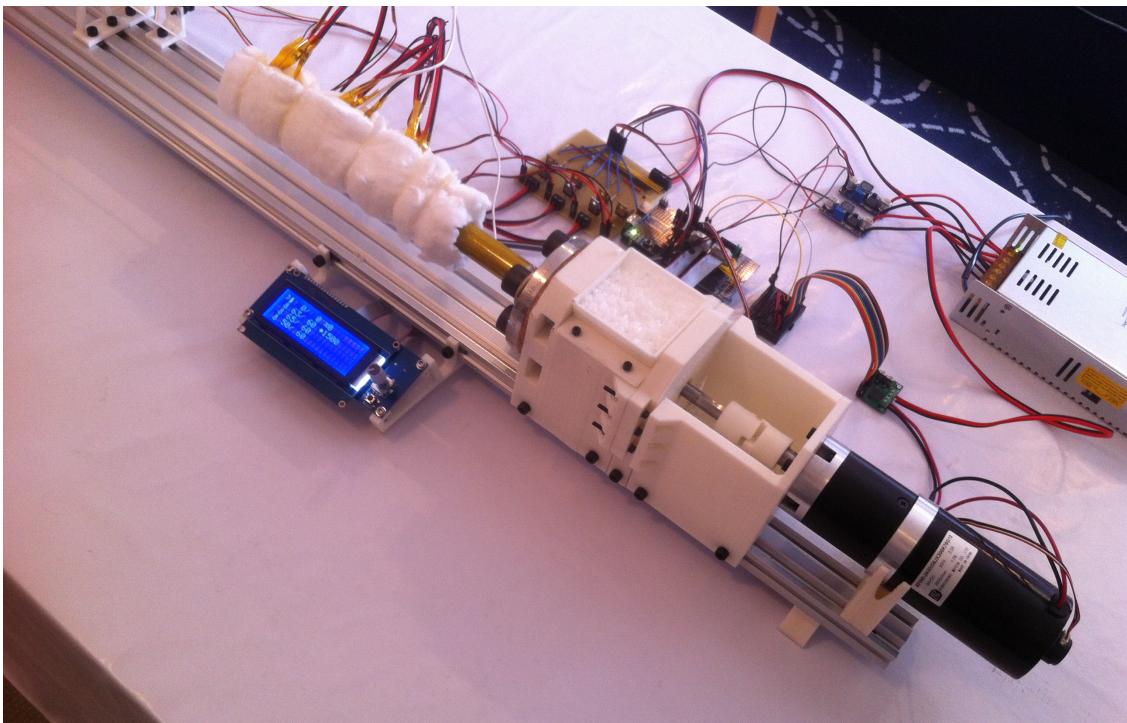


Figura 79 Extrusor

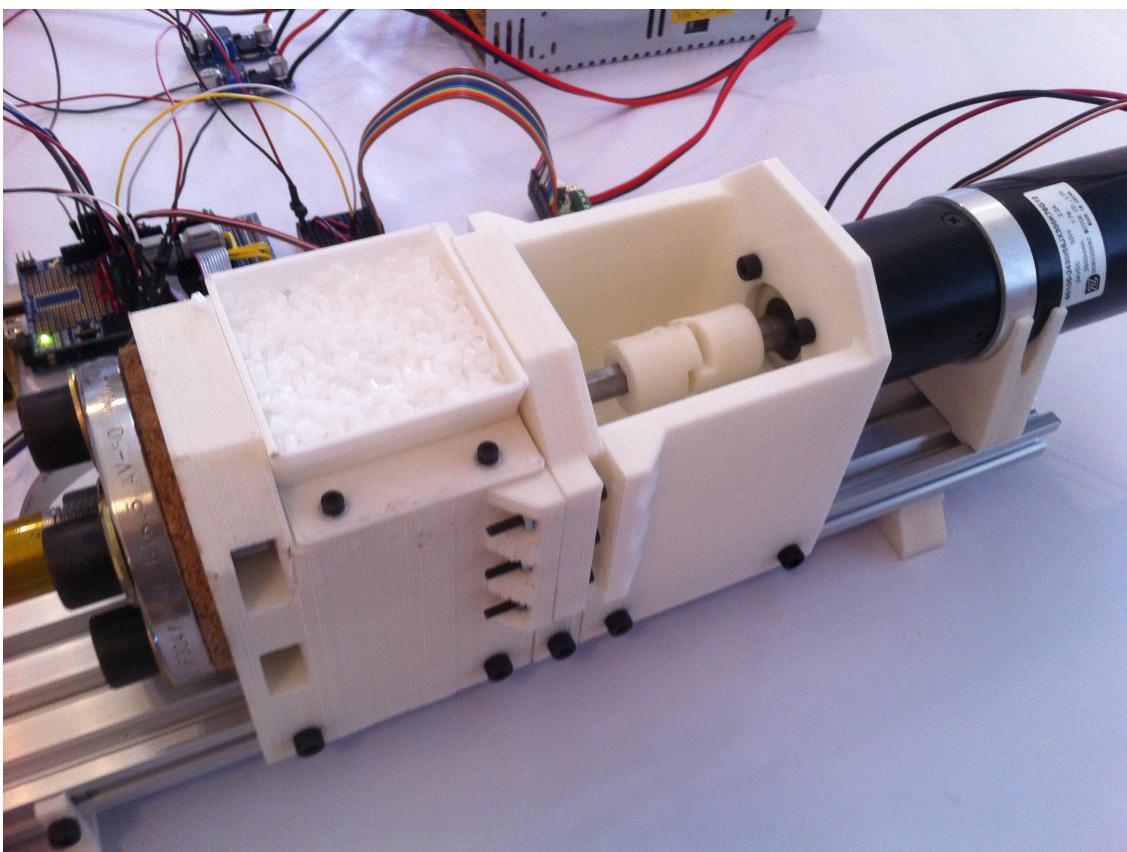


Figura 80 Cuerpo del extrusor.

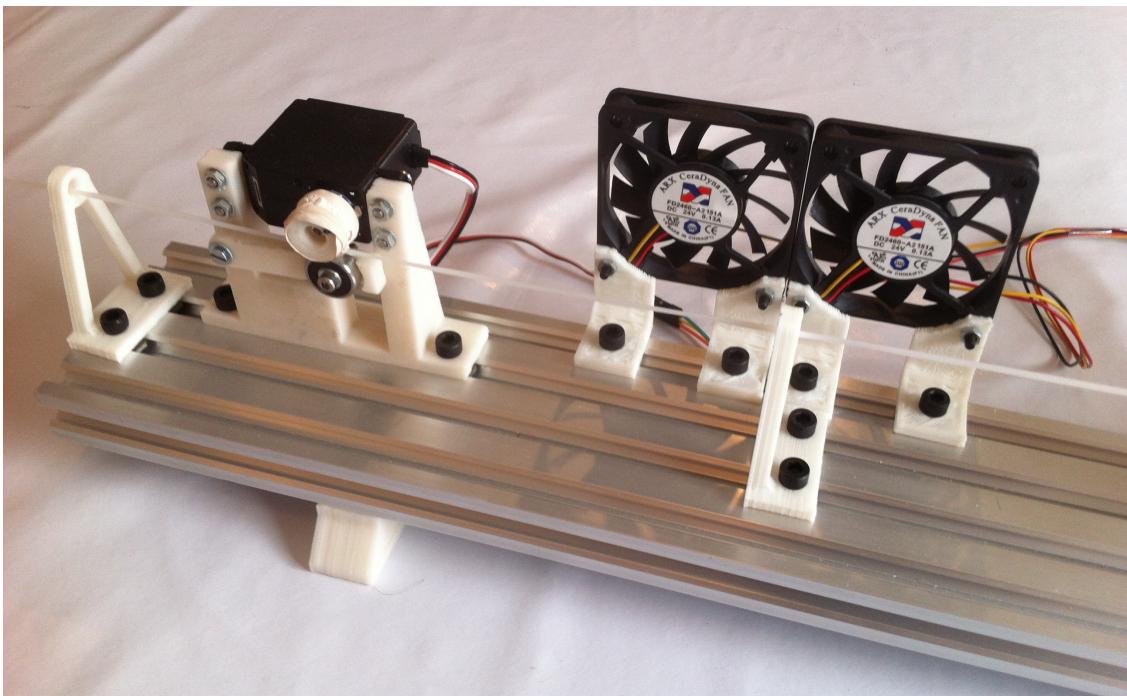


Figura 81 Puller y sistema de refrigeración.

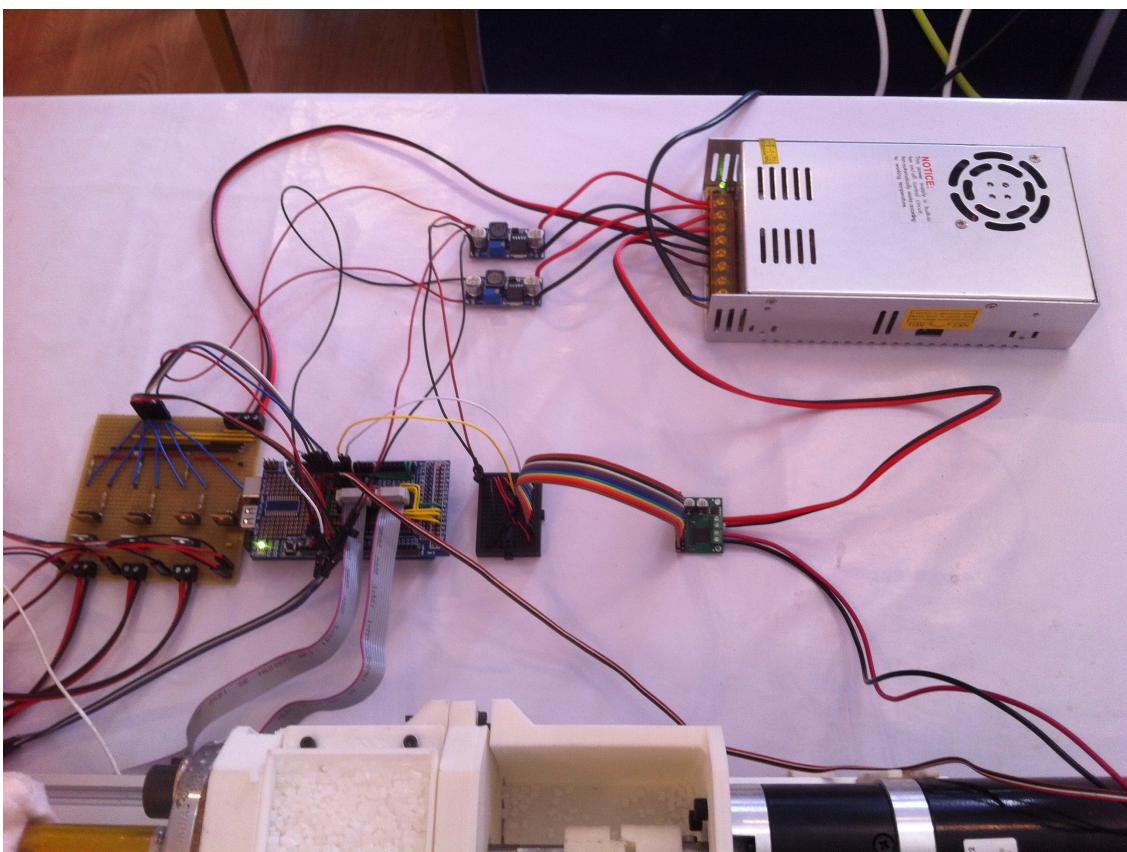


Figura 82 Electrónica.

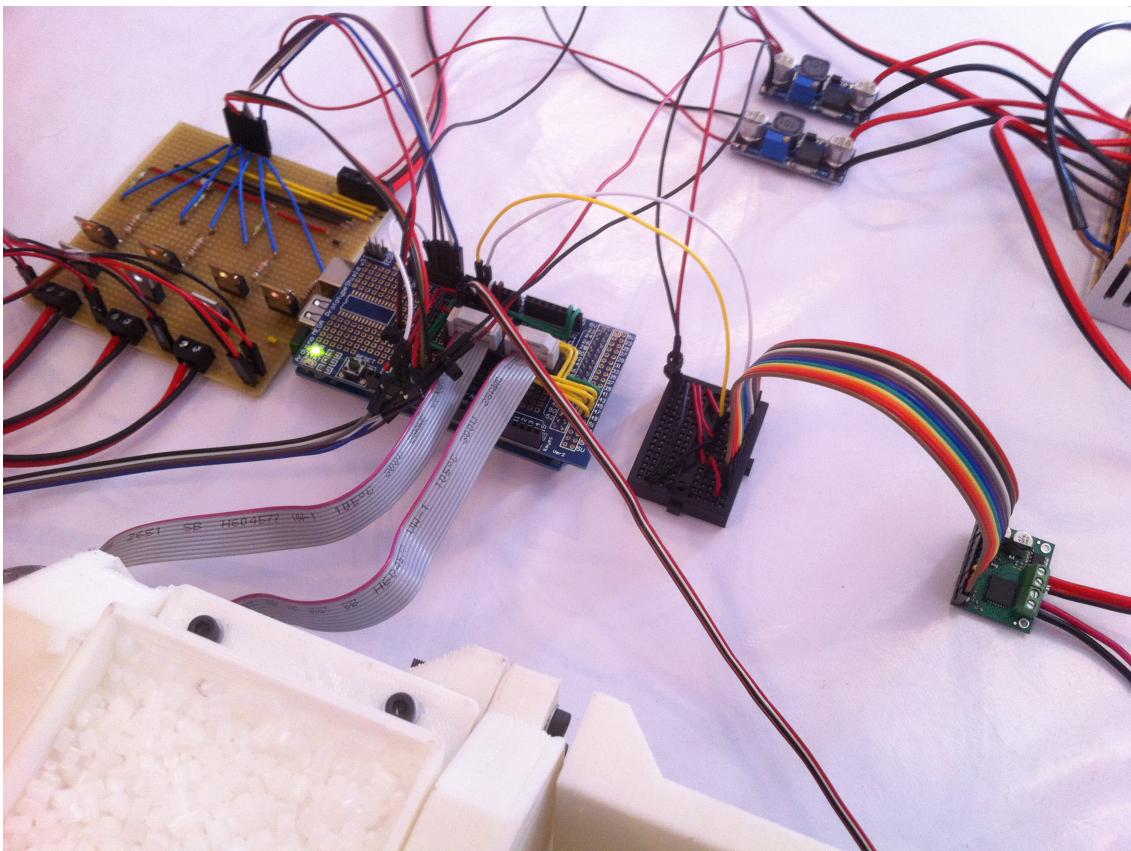


Figura 83 Electrónica de control de la línea.

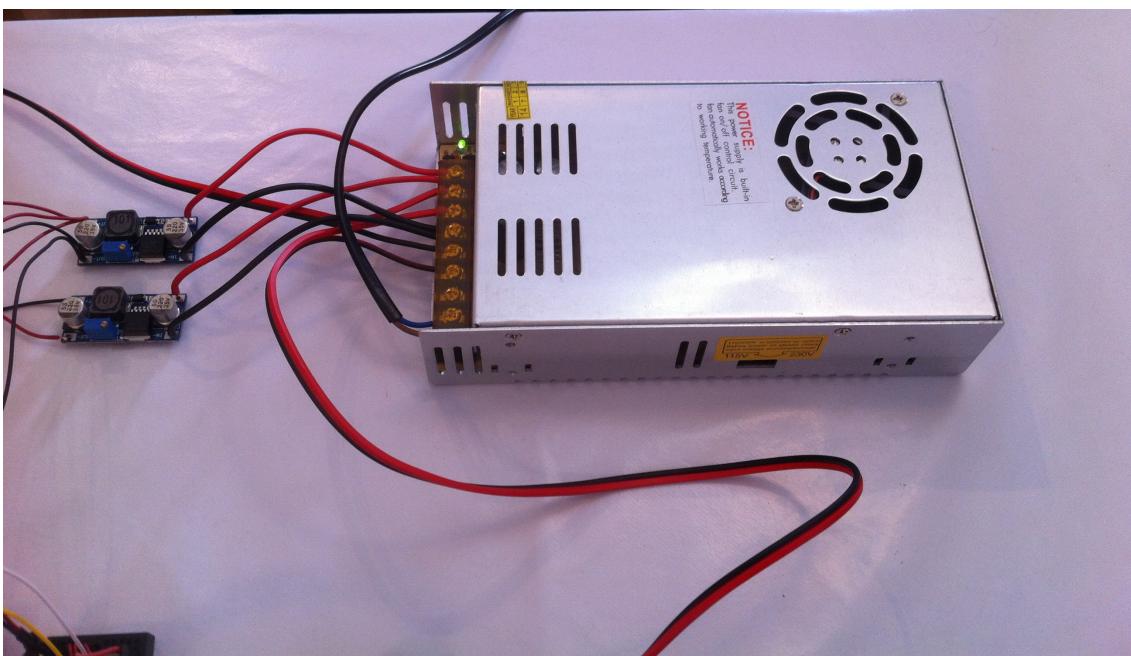


Figura 84 Electrónica de potencia (fuente y convertidores DC/DC).

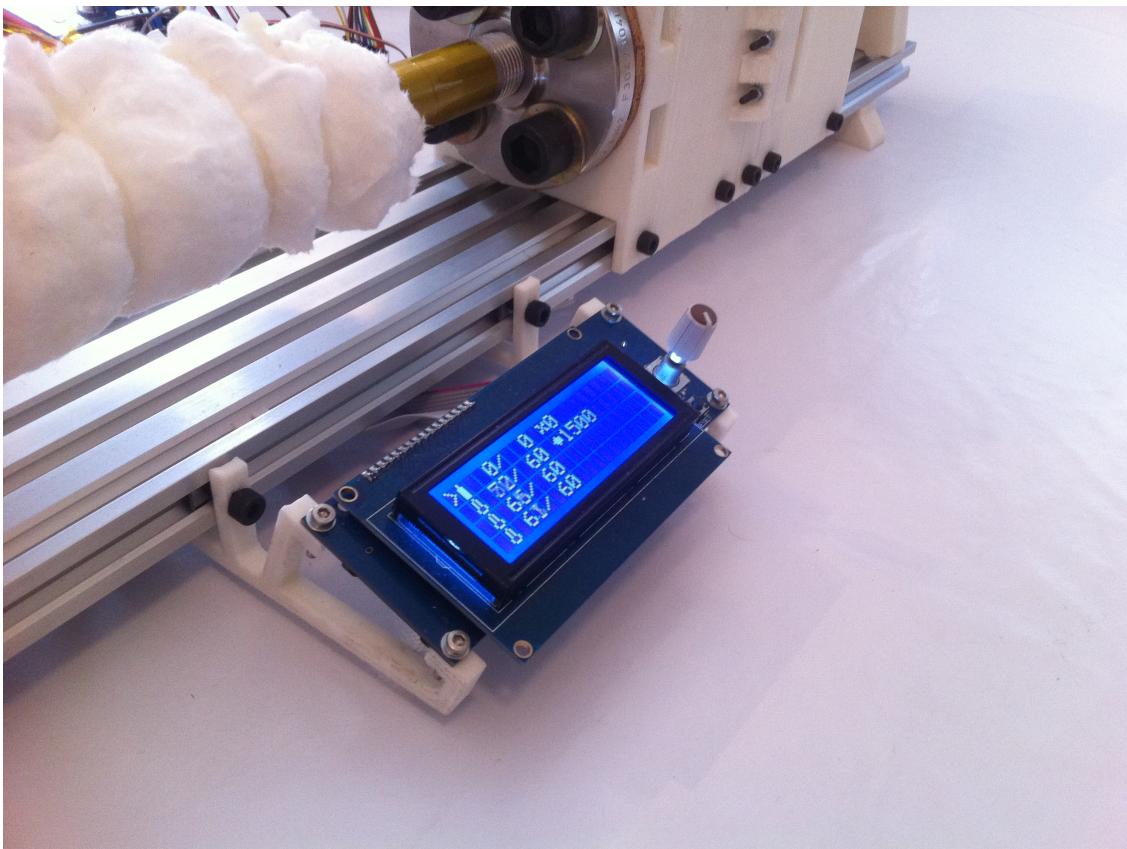


Figura 85 Interfaz (pantalla LCD con encoder pulsable).

4.2 Cumplimiento de objetivos

Al principio del proyecto se declararon unas directrices básicas que debe cumplir el extrusor, que son:

- Coste y tamaño reducido.
- Fuentes abiertas a disposición de cualquier persona y organización.
- Procesos de fabricación y componentes replicables sin necesidad de tener acceso a herramientas o proveedores especializados, para favorecer la replicabilidad del diseño.

Al tratarse de criterios subjetivos, la valoración de su cumplimiento es interpretable. El coste y tamaño se han tratado de mantener en un rango razonable, obteniéndose una máquina de con un coste en materiales de 375€ euros y unas dimensiones aproximadas de 100x15x20 cm con la electrónica aparte.

Las fuentes efectivamente se han liberado por medio del repositorio online del proyecto [2].

En cuanto a la replicabilidad del diseño, se han empleado componentes estándar, ampliamente disponibles (*off the shelf*) para un público no especializado. Los procesos

también se pueden realizar sin medios especialmente caros o restringidos. La excepción que se ha producido en este sentido es el uso de mecanizado para eliminar las rebabas del tubo que forma el barril (véase página 56).

También se establecieron unas especificaciones mínimas, a saber:

1. Coste de los materiales de cada unidad menor de 500€.
2. Capacidad mínima de 0.25kg/h (1kg cada 4 horas).
3. El material de extrusión será ABS.
4. El filamento producto de la extrusión debe ser utilizable por una impresora 3D.

Se pudieron cumplir la totalidad de estos requerimientos, las resultados obtenidas se resumen en la Tabla 16.

Tabla 16 Resumen del cumplimiento de las especificaciones del proyecto.

Especificación	Objetivo	Resultado
Coste máximo de materiales	<500€	375€
Capacidad mínima	>0.25kg/h	0.4kg/h
Materiales de extrusión	ABS	ABS
Utilidad del filamento	Filamento funcional	Filamento funcional

Por último, se establecía el cumplimiento opcional de otras indicaciones, que son:

1. Cuando sea posible, el proyecto debe emplear herramientas, productos y métodos Open Source.
2. Los componentes empleados serán preferiblemente normalizados, estándar o fáciles de adquirir por cualquier persona.
3. Se evitarán el uso de operaciones de mecanizado para la producción del extrusor, mas allá del taladrado con herramienta de mano.
4. Se liberará la documentación y fuentes del diseño en plataformas accesibles a otros usuarios interesados en el proyecto.

En general, se han respetado las directrices impuestas, como se detalla a continuación:

1. El software y hardware del proyecto se ha basado en productos open source: Arduino Mega, FreeCAD, iPython, etc.
2. Se han empleado componentes accesibles en la construcción del extrusor, empleando material disponible a cualquier cliente a través de tiendas online y físicas.
3. No se ha podido evitar por completo el uso de operaciones de mecanizado, ya que es necesario eliminar material de exceso en el tubo (barril) mediante el taladrado en un taladro de columna o en un torno. En este sentido, sin embargo, se ha empleado la impresión 3D para facilitar la creación de piezas a medida.
4. La documentación y archivos del diseño se han liberado en un repositorio online de la plataforma Github [2].

4.3 Comparación con otros modelos

Se incluye a continuación la Tabla 17 con las características de los extrusores de otros autores que se analizaron al comienzo de este proyecto. Junto con ellos, se exponen también los resultados obtenidos para el extrusor diseñado.

Tabla 17 Tabla comparativa del modelo diseñado y las soluciones previas. Fuentes: [20]–[26]

	Par de detenimiento del motor	Velocidad del motor	Tiempo para extruir 1kg	Diámetro del husillo	Longitud del husillo	Tolerancia declarada
Diseño de este proyecto	54.7 N·m	33 rpm	2.5h	16mm	360mm	Prototipo: $\pm 0.31\text{mm}$ Modelo final: $\pm 0.49\text{mm}$
Lyman v3 Extruder	2.942 N·m	13.5 rpm	8h	5/8" (15.875mm)	142 mm	$\pm 0.1\text{mm}$
Filastruder	12 N·m	3 rpm	24h	5/8" (15.875mm)	-	$\pm 0.05\text{mm}$
X3uder	22.56 N·m	2.5 rpm	10-12h	5/8" (15.875mm)	-	$\pm 0.05\text{mm}$
ExtrusionBot	-	-	5-6h	-	-	$\pm 0.1\text{mm}$
STRUdittle	-	-	8-16h	-	-	$\pm 0.05\text{mm}$
FilaFab	-	-	5-6h	-	-	-

Se puede observar como, al tener un sistema motor más rápido y potente, el diseño desarrollado es capaz de superar en capacidad al resto de soluciones similares. De las variables que se incluyen en la Tabla 17, la que es claramente inferior en el presente modelo frente a las otras soluciones es la tolerancia obtenida.

En las fuentes consultadas ([20]–[25]) el resto de autores de extrusores de filamento afirman haber conseguido tolerancias que igualan o mejoran las del filamento comercial (véase página 36), más estrechas de las obtenidas en ninguna de las pruebas de este proyecto.

Un aspecto reseñable sobre la calidad del filamento es que se obtuvieron mejores tolerancias en el prototipo inicial ($\pm 0.31\text{mm}$) que en el modelo final ($\pm 0.49\text{mm}$). Sin embargo, en ningún caso se alcanzaron valores de $\pm 0.1\text{mm}$ o menos. Se han propuesto dos hipótesis sobre la causa de este hecho: un control de la temperatura deficiente o atascos de material semi-fundido (desarrolladas en la página 102).

La calidad del filamento es un punto mejorable de este proyecto, y debe ser objeto de un proceso de determinación de las causas y calibración si este trabajo tiene continuidad en el futuro.

En otros aspectos, sin embargo, el extrusor también ha presentado mejoras respecto a los otros modelos existentes, que se describen a continuación.

El aspecto más destacable es que es el único diseño controlado por un microcontrolador, con lo que todas las funciones están centralizadas en un único dispositivo programable con acceso a todos los sensores. Otros diseños emplean motores sin control de velocidad, módulos PID independientes y ventiladores conectados directamente a la fuente. Se ha de reconocer que desde el momento en el que se analizaron las soluciones ha aparecido la versión 5 del extrusor Lyman [50], mejorando sustancialmente la versión 3 considerada, y que incluye también control por Arduino. La adición de un microcontrolador también ha permitido incluir una interfaz de usuario con pantalla LCD.

Otra mejora introducida en este proyecto es el diseño modular de la línea de extrusión. El uso del raíl, un perfil extruido de aluminio, permite que los elementos de la línea se posicionen en diferentes configuraciones y se añadan nuevos módulos sobre la plataforma ya desarrollada. Además, es el único diseño con varias zonas calientes, haciéndolo más parecido a los extrusores convencionales.

Por último, la documentación facilitada se considera un aspecto fundamental en los proyectos analizados, ya que muchos de ellos tienen una filosofía abierta. El nivel de información suministrada varía ampliamente en cantidad y calidad de un extrusor a otro, siendo el Lyman Filament Extruder y el Filastruder los mejores proyectos según este criterio. En este sentido se ha intentado documentar el trabajo realizado y liberar las fuentes del diseño, de manera que se espera poder ampliar el corpus de información disponible en el nicho de los extrusores de filamento open source.

4.4 Mejoras

El extrusor de filamento presentado es susceptible de ser perfeccionado en varias de sus áreas; a continuación se presentan una serie de aspectos concretos que se han detectado durante el diseño, construcción y en ensayo del sistema:

- **Mayor integración del sistema electrónico.** El estado actual del producto presenta una electrónica formada por varias placas interconectadas, algunas de ellas placas de prototipo (breadboard). Un diseño mejorado debería integrar todas estas funciones en una sola placa PCB que se conecte al Arduino Mega, y debería estar integrado físicamente en el extrusor, por ejemplo, fijado al raíl.
- **Implementar más opciones del driver del motor.** El presente diseño hace uso del driver MC33926 para regular la velocidad del motor mediante una señal PWM. Sin embargo, el circuito tiene más funciones que no han sido implementadas en el sistema: aviso de sobrecorriente, medida de la intensidad del motor, revertir el sentido de giro... Algunas de estas funciones pueden ser incluidas para aumentar la robustez del sistema.

- **Control en ciclo cerrado del motor.** La velocidad del motor ha resultado ser lo suficientemente constante en lazo abierto de control; sin embargo, se puede implementar un control PID para intentar mejorar la estabilidad o para que el usuario introduzca directamente la velocidad deseada, en vez del ciclo de trabajo.
- **Integración de la interfaz en la librería.** Aunque en el software desarrollado se ha separado la lógica de control de la interfaz (LCD y encoder) y la del resto de elementos del extrusor, se puede integrar la primera en la librería para ofrecer una solución unificada.
- **Implementar más funciones del módulo LCD.** La pantalla LCD incluye dos elementos que no se usan en este proyecto: un zumbador y una unidad de lectura/escritura de tarjetas SD. Con ellos se podría implementar un sistema de alarma o de registro de datos (datalogging), respectivamente.
- **Calibración del módulo PID.** Aunque los parámetros de control de los módulos PID implementados han resultado suficientes para esta aplicación, éstos se han determinado mediante ensayo-error y el comportamiento podría mejorar con un método más riguroso.
- **Estudio mediante elementos finitos del problema.** Una simulación de elementos finitos de fluidos, térmico y mecánico debería contribuir a la comprensión del problema y a la mejora del sistema.
- **Mejoras del control del puller.** En vez de controlar la velocidad del *puller* mediante el ancho de pulso de la señal de control, el usuario debería de ser capaz de introducir directamente la velocidad de extracción (por ejemplo en m/min). A partir de esta modificación también se podría contabilizar los metros de filamento extruido.
- **Desarrollo de un sistema de bobinado.** Este sistema ya está integrado en otras soluciones, como el Lyman [21], y completaría la línea de producción de filamento.

Además de estas mejoras concretas, el objetivo fundamental posterior a este trabajo debería ser el control de la tolerancia del filamento extruido, como ya se ha expuesto en el apartado anterior. Para ello se propone la realización de pruebas de calibración a diferentes temperaturas y velocidades de extrusión. Otro punto que puede mejorar la calidad es el uso de la ya mencionada boquilla más progresiva. Por último, un ensayo térmico detallado puede ayudar a comprender la distribución de temperaturas a lo largo del extrusor y ofrecer un diseño con una transición más brusca de la zona fría a la caliente, para evitar los atascos del material.

4.5 Valoración final

El objetivo de este proyecto se estableció como el desarrollo de un extrusor de filamento 3D que se diseñara bajo unos criterios de bajo coste, fuentes abiertas y reproducibilidad. Este enfoque concuerda con el público al que va dirigido: usuarios de impresión 3D que quieren construir su propio extrusor y personas u organizaciones que desean emplearlo como un punto de partida para sus propios diseños. Finalmente, se ha podido diseñar, construir y ensayar un sistema compuesto del propio extrusor y algunos otros elementos de la línea de extrusión (sistema de refrigeración y de extracción).

El resultado del proyecto ha sido satisfactorio, representando una mejora respecto otras soluciones disponibles y cumpliendo con los objetivos de coste y funcionalidad (siendo capaz de extruir filamento apto para ser empleado en una impresora 3D) establecidos.

El aspecto más negativo del proyecto es la tolerancia del filamento que se ha obtenido. La calidad dimensional que se ha podido documentar (mejor resultado del modelo final: $\pm 0.49\text{mm}$) está bastante por encima de la del filamento comercial ($\pm 0.10\text{mm}$) y de los resultados reportados por otros autores de extrusores similares (de $\pm 0.05\text{mm}$ a $\pm 0.10\text{mm}$). Este punto debería ser objeto de un estudio y calibración más riguroso en caso de continuarse el desarrollo del extrusor presentado.

A pesar de ello, la documentación facilitada en esta memoria y reunida en el repositorio online del proyecto [2] ofrece un punto de partida para el estudio y construcción de este tipo de extrusores de filamento. El autor quedaría satisfecho si toda la información liberada por medio de esta iniciativa pudiera ser de utilidad para cualquier usuario u organización con ánimo de aprender sobre el problema de la extrusión, de construir su propia máquina o de crear su propio diseño derivado.

5 Bibliografía

- [1] C. W. Hull, "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography," 1986.
- [2] "Filament Extruder - Github." [Online]. Available: https://github.com/diegotrap/filament_extruder.
- [3] C. Rauwendaal, ***Understanding extrusion***. Hanser Publishers, 1998.
- [4] C. Rauwendaal, ***Polymer Extrusion***, Third. Hanser Publishers, 1994.
- [5] J. L. White and H. Potente, ***Screw Extrusion***. Hanser Publishers.
- [6] J. A. Dantzig and C. L. Tucker III, "Newtonian flow in a thin channel," in ***Modeling in Materials Processing***, .
- [7] H. F. Giles, J. R. Wagner, and E. M. Mount, "3 - Single Screw Extruder: Equipment," in ***Extrusion***, Elsevier, 2005, pp. 13–34.
- [8] Makerbot, "Makerbot Filament Store." [Online]. Available: <http://store.makerbot.com/filament>. [Accessed: 29-Sep-2014].
- [9] Taulman3D, "taulman 3D - Home." [Online]. Available: <http://taulman3d.com/>. [Accessed: 23-Sep-2014].
- [10] Taulman3D, "taulman3D ToolBox Kickstarter campaign," 2014. [Online]. Available: <https://www.kickstarter.com/projects/2144287795/taulman3d-toolbox-of-6-new-materials>. [Accessed: 23-Sep-2014].
- [11] H. F. Giles, J. R. Wagner, and E. M. Mount, "4 – Plastic Behavior in the Extruder," in ***Extrusion***, Elsevier, 2005, pp. 35–52.
- [12] International Organization for Standardization, "ISO 1133-1:2011 - Plastics -- Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics -- Part 1: Standard method." [Online]. Available: http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=44273. [Accessed: 21-Sep-2014].
- [13] "SABIC Innovative Plastics Cycolac® MG94 ABS." [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=878826c0d14c40eb8c08a95a7e03f01e>. [Accessed: 23-Sep-2014].
- [14] "Chi Mei Polylac® PA-747 ABS Resin - General Purpose." [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matid=50513>. [Accessed: 23-Sep-2014].
- [15] MatWeb, "Overview of materials for Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Molded." [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=eb7a78f5948d481c9493a67f0d089646&ckck=1>. [Accessed: 21-Sep-2014].

- [16] E. Manias, “MatSE447 Rheology & Processing Lecture Notes.” 2012.
- [17] S. Syrjala, “On the analysis of fluid flow and heat transfer in the melt conveying section of a single-screw extruder,” *Numer. Heat Transf. Part A -- Appl.*, vol. 35, no. 1, pp. 25–47, 1999.
- [18] “ABS filament 3.0/1.75mm for rereprap 3D printer - Sun Ya Tech Inc Co., Limited.” [Online]. Available: <http://esunpla.en.ecplaza.net/abs-filament-3-0-1--224735-2445969.html>. [Accessed: 20-Sep-2014].
- [19] H. Lyman, “LYMAN FILAMENT EXTRUDER by hlyman - Thingiverse,” 2012. [Online]. Available: <http://www.thingiverse.com/thing:30642>. [Accessed: 21-Sep-2014].
- [20] T. Elmore, “Filastruder developement thread,” 2012. [Online]. Available: <http://www.soliforum.com/post/4783/#p4783>. [Accessed: 21-Sep-2014].
- [21] H. Lyman, “Lyman Filament Extruder v3 Manual,” 2013. [Online]. Available: https://thingiverse-production.s3.amazonaws.com/assets/0c/6a/ff/fc/a4/LYMAN_FILAMENT_EXTRUDER_V3_MANUAL.pdf. [Accessed: 21-Sep-2014].
- [22] T. Elmore, “Filastruder Kickstarter campaign,” 2013. [Online]. Available: <https://www.kickstarter.com/projects/833191773/filastruder-a-robust-inexpensive-filament-extruder>. [Accessed: 21-Sep-2014].
- [23] Mirox3m, “X3uder - OS 12VDC RepRap Filament extruder by mirox3m - Thingiverse,” 2013. [Online]. Available: <http://www.thingiverse.com/thing:197184>. [Accessed: 21-Sep-2014].
- [24] M. Dill, “Extrusion Bot Kickstarter campaign,” 2013. [Online]. Available: <https://www.kickstarter.com/projects/1622873957/the-fastest-filament-extrusion-bot-makes-abs-pla-i>. [Accessed: 21-Sep-2014].
- [25] B. Fishler, “STRUdittle Kickstarter campaign,” 2013. [Online]. Available: <https://www.kickstarter.com/projects/1096453211/strudittle-a-tiny-fast-precise-low-cost-filament-e>. [Accessed: 21-Sep-2014].
- [26] E. Clifford, “FilaFab Kickstarter campaign,” 2013. [Online]. Available: <https://www.kickstarter.com/projects/1574214560/desktop-plastic-extrusion-system-for-everyone>. [Accessed: 21-Sep-2014].
- [27] OmniDynamics, “Strooder Kickstarter campaign,” 2014. [Online]. Available: <https://www.kickstarter.com/projects/omnidynamics/strooder-first-truly-consumer-3d-printing-filament>. [Accessed: 21-Sep-2014].
- [28] F. Pérez and B. E. Granger, “IPython: A system for interactive scientific computing,” *Comput. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 21–29, 2007.
- [29] “FreeCAD: An Open Source parametric 3D CAD modeler.” [Online]. Available: <http://freecadweb.org/>. [Accessed: 22-Sep-2014].
- [30] “GitHub.” [Online]. Available: <http://github.com>.
- [31] “Slic3r - G-code generator for 3D printers.” [Online]. Available: <http://slic3r.org/>. [Accessed: 22-Sep-2014].

- [32] “Repetier-Host Documentation.” [Online]. Available: <http://www.repetier.com/documentation/repetier-host/>. [Accessed: 22-Sep-2014].
- [33] R. Sadeghbeigi, “Appendix 11 – Nominal Pipe Sizes,” in *Fluid Catalytic Cracking Handbook*, Elsevier, 2000, pp. 353–354.
- [34] Colder Products Company, “Pipe Thread Types and Designations White Paper.” [Online]. Available: http://www.colder.com/Portals/0/Library/Resources/Literature/WhitePapers/Documents/NPT_whitepaper.pdf. [Accessed: 24-Sep-2014].
- [35] “Phidgets Inc. - 3273E_0 - 24V/82.6Kg-cm/33RPM 76:1 DC Gear Motor w/Encoder.” [Online]. Available: http://www.phidgets.com/products.php?category=38&product_id=3273E_0. [Accessed: 17-Sep-2014].
- [36] “Arduino - ArduinoBoardMega2560.” [Online]. Available: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>. [Accessed: 17-Sep-2014].
- [37] “Arduino - AnalogWrite.” [Online]. Available: <http://arduino.cc/en/Reference/analogWrite>. [Accessed: 18-Sep-2014].
- [38] “MC33926 Motor Driver Carrier, Pololu.” [Online]. Available: <http://www.pololu.com/product/1212>. [Accessed: 17-Sep-2014].
- [39] International Rectifier, “IRL540N Datasheet.” [Online]. Available: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irl540n.pdf>. [Accessed: 17-Sep-2014].
- [40] Fairchild Semiconductor, “RHRP1540, RHRP1560 Datasheet.” [Online]. Available: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/RH/RHRP1560.pdf>. [Accessed: 17-Sep-2014].
- [41] GADGETS3D, “RAMPS 1.3/1.4 GADGETS3D Shield with Panel - RepRapWiki.” [Online]. Available: http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.3/1.4_GADGETS3D_Shield_with_Panel. [Accessed: 24-Sep-2014].
- [42] “Arduino Mega Schematic.” [Online]. Available: <http://arduino.cc/en/uploads/Main/arduino-mega-schematic.pdf>. [Accessed: 17-Sep-2014].
- [43] “MC33269-D Linear Regulator Datasheet.” [Online]. Available: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC33269-D.PDF. [Accessed: 17-Sep-2014].
- [44] “LM2596 Modulo Conversor DC DC Step Down Module | eBay.” [Online]. Available: http://www.ebay.com/itm/271560571851?_trksid=p2060778.m2749.l2649&ssPageName=STRK%3AMEBIDX%3AIT. [Accessed: 24-Sep-2014].
- [45] “PIDLibrary Documentation.” [Online]. Available: <http://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary>. [Accessed: 18-Sep-2014].
- [46] “Encoder Library, for Measuring Quadrature Encoded Position or Rotation Signals.” [Online]. Available: https://www.pjrc.com/teensy/td_libs_Encoder.html. [Accessed: 18-Sep-2014].

- [47] “Arduino - Servo.” [Online]. Available: <http://arduino.cc/en/reference/servo>. [Accessed: 18-Sep-2014].
- [48] M. Palacios, “Air 2 - RepRapWiki.” [Online]. Available: http://reprap.org/wiki/Air_2. [Accessed: 21-Sep-2014].
- [49] “J Head Nozzle - RepRapWiki.” [Online]. Available: http://reprap.org/wiki/J_Head_Nozzle. [Accessed: 21-Sep-2014].
- [50] H. Lyman and F. Mulier, “Lyman / Mulier Filament Extruder v5 Manual.” [Online]. Available: https://thingiverse-production.s3.amazonaws.com/assets/b5/39/3a/47/23/LYMAN_MULIER_FILAMENT_EXTRUDER_V5_MANUAL_R1.pdf. [Accessed: 22-Sep-2014].

6 Anexos

6.1 Hoja de datos del ABS MAGNUM 8391

**MAGNUM™ 8391****ABS Resin****Overview**

MAGNUM™ 8391 ABS combines an excellent glossy appearance with high flow and medium impact performance. The mass (continuous process) ABS technology of Styron ensures an ABS resin that combines excellent processability with a stable light base color that is ideal for self-coloring.

Applications:

- Household Appliance
- Consumer Goods
- Toys

Physical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Density	1.05 g/cm³	1.05 g/cm³	ASTM D792 ISO 1183/B
Apparent Density	0.65 g/cm³	0.65 g/cm³	ISO 60
Melt Mass-Flow Rate (MFR)			
220°C/10.0 kg	28 g/10 min	28 g/10 min	ASTM D1238 ISO 1133
230°C/3.8 kg	8.0 g/10 min	8.0 g/10 min	ASTM D1238
Molding Shrinkage - Flow	0.0040 to 0.0070 in/in	0.40 to 0.70 %	ASTM D955 ISO 294-4
Mechanical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Modulus			ISO 527-2
0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	339000 psi	2340 MPa	
Tensile Strength			
Yield	6960 psi	48.0 MPa	ASTM D638 ¹
Yield, 0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	6530 psi	45.0 MPa	ISO 527-2/50
Yield, 0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	6820 psi	47.0 MPa	ISO 527-2/100
Break	5080 psi	35.0 MPa	ASTM D638 ¹
Tensile Elongation			
Yield	2.7 %	2.7 %	ASTM D638 ¹
Yield, 0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	2.5 %	2.5 %	ISO 527-2/50
Yield, 0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	2.6 %	2.6 %	ISO 527-2/100
Break	8.7 %	8.7 %	ASTM D638 ¹
Flexural Modulus			
--	360000 psi	2480 MPa	ASTM D790 ²
0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	348000 psi	2400 MPa	ISO 178 ^{3, 4}
Flexural Strength			
--	10900 psi	75.0 MPa	ASTM D790 ²
0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	10200 psi	70.0 MPa	ISO 178 ^{3, 4}
Impact	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Charpy Notched Impact Strength			ISO 179/1eA
-22°F (-30°C), Injection Molded	4.3 ft·lb/in²	9.0 kJ/m²	
73°F (23°C), Injection Molded	9.0 ft·lb/in²	19 kJ/m²	
Notched Izod Impact			
73°F (23°C)	4.4 ft·lb/in	230 J/m	ASTM D256
-22°F (-30°C), Injection Molded	4.3 ft·lb/in²	9.0 kJ/m²	ISO 180/A
73°F (23°C), Injection Molded	9.0 ft·lb/in²	19 kJ/m²	ISO 180/A
Hardness	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Rockwell Hardness (R-Scale)	108	108	ASTM D785

Thermal	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Deflection Temperature Under Load			
66 psi (0.45 MPa), Unannealed	189 °F	87.0 °C	ASTM D648
264 psi (1.8 MPa), Unannealed	165 °F	74.0 °C	ASTM D648
264 psi (1.8 MPa), Annealed	203 °F	95.0 °C	ISO 75-2/A
Vicat Softening Temperature			
--	210 °F	99.0 °C	ASTM D1525 ⁵
--	203 °F	95.0 °C	ISO 306/B50
Flammability	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Burning Rate (0.0787 in (2.00 mm))	2.4 in/min	60 mm/min	ISO 3795 ⁶
Flame Rating			UL 94 ⁶
0.0591 in (1.50 mm)	HB	HB	
0.118 in (3.00 mm)	HB	HB	

Notes

These are typical properties only and are not to be construed as specifications. Users should confirm results by their own tests.

¹ 2.0 in/min (50 mm/min)

² 0.051 in/min (1.3 mm/min)

³ 0.079 in/min (2.0 mm/min)

⁴ 3-points

⁵ Rate B (120°C/h), Loading 1 (10 N)

⁶ This rating not intended to reflect hazards presented by this or any other material under actual fire conditions.

Product Stewardship

Styron LLC, Styron HoldCo B.V., and subsidiaries ("Styron") have a fundamental concern for all who make, distribute, and use its products and for the environment in which we live. This concern is the basis for our Product Stewardship philosophy by which we assess the safety, health and environmental information on our products to protect employee and public health and our environment. The success of our product stewardship program rests with each and every individual involved with Styron products – from the initial concept and research, to manufacture, use, sales, disposal and recycle of each product.

Customer Notice

Customers are responsible for reviewing their manufacturing processes and their applications of Styron products from the standpoint of human health and environmental quality to ensure that Styron products are not used in ways for which they are not suitable. Styron personnel are available to answer questions and to provide reasonable technical support. Styron product literature, including safety data sheets, should be consulted prior to the use of Styron products. Current safety data sheets are available from Styron.

Notice Regarding Medical Application Restrictions

Styron requests that customers considering the use of Styron products in medical applications notify Styron so that appropriate assessments may be conducted.

Styron does not endorse or claim suitability of its products for specific medical applications and does not knowingly sell or sample its products or services for certain medical applications. It remains the responsibility of the medical device or pharmaceutical manufacturer to determine that the Styron product is safe, lawful, and technically suitable for the intended use.

Disclaimer

No freedom from infringement of any patent owned by Styron or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, the Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for the Customer's use and for ensuring that the Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. **STYRON ASSUMES NO OBLIGATION OR LIABILITY FOR THE INFORMATION IN THIS DOCUMENT. NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.**

If products are described as "experimental" or "developmental": 1.) product specifications may not be fully determined; 2.) analysis of hazards and caution in handling and use are required; 3.) there is greater potential for Styron to change specifications and/or discontinue production; and 4.) although Styron may from time to time provide samples of such products, Styron is not obligated to supply or otherwise commercialize such products for any use of application whatsoever.

Responsible Care®

Our top priority is to provide the highest quality products and services, and to focus on the American Chemistry Council's Responsible Care® initiative and safety in all of our facilities.

Additional Information

North America	Europe/Middle East	
U.S. & Canada: 1-888-STYRON1 1-989-633-1718	Germany: +800 444 11 444 +31-11567-2626 +8001811361	
Mexico: +1-800-441-4369		
Latin America	Asia Pacific	
Argentina: +54-11-4319-0100	+800-7776-7776 +603-7965-5319	
Brazil: +55-11-5188-9000		
Colombia: +57-1-219-6000		
Mexico: +52-55-5201-4700		

www.styron.com

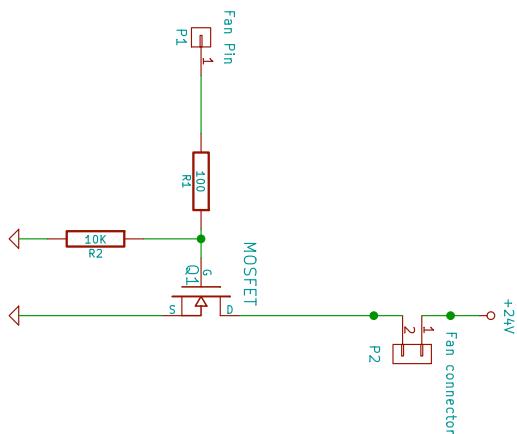
This document is intended for use within Asia Pacific, Europe, North America

Published: January 2014

© 2014 Styron LLC, Styron HoldCo B.V., and subsidiaries



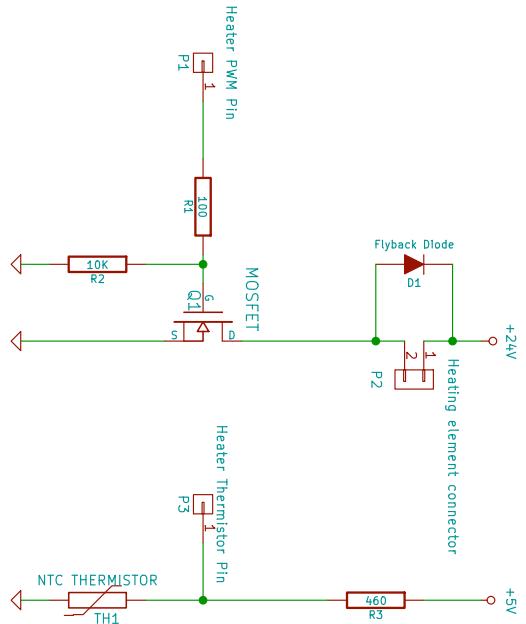
6.2 Esquemas electrónicos



Sheet: /
File: fan_control_electronics.sch

Title: Fan Control Electronics

Size: A4	Date:
KiCad EDA	eeschema (2014-03-01 BZR 4730)-product
5	Rev: 1/1
6	



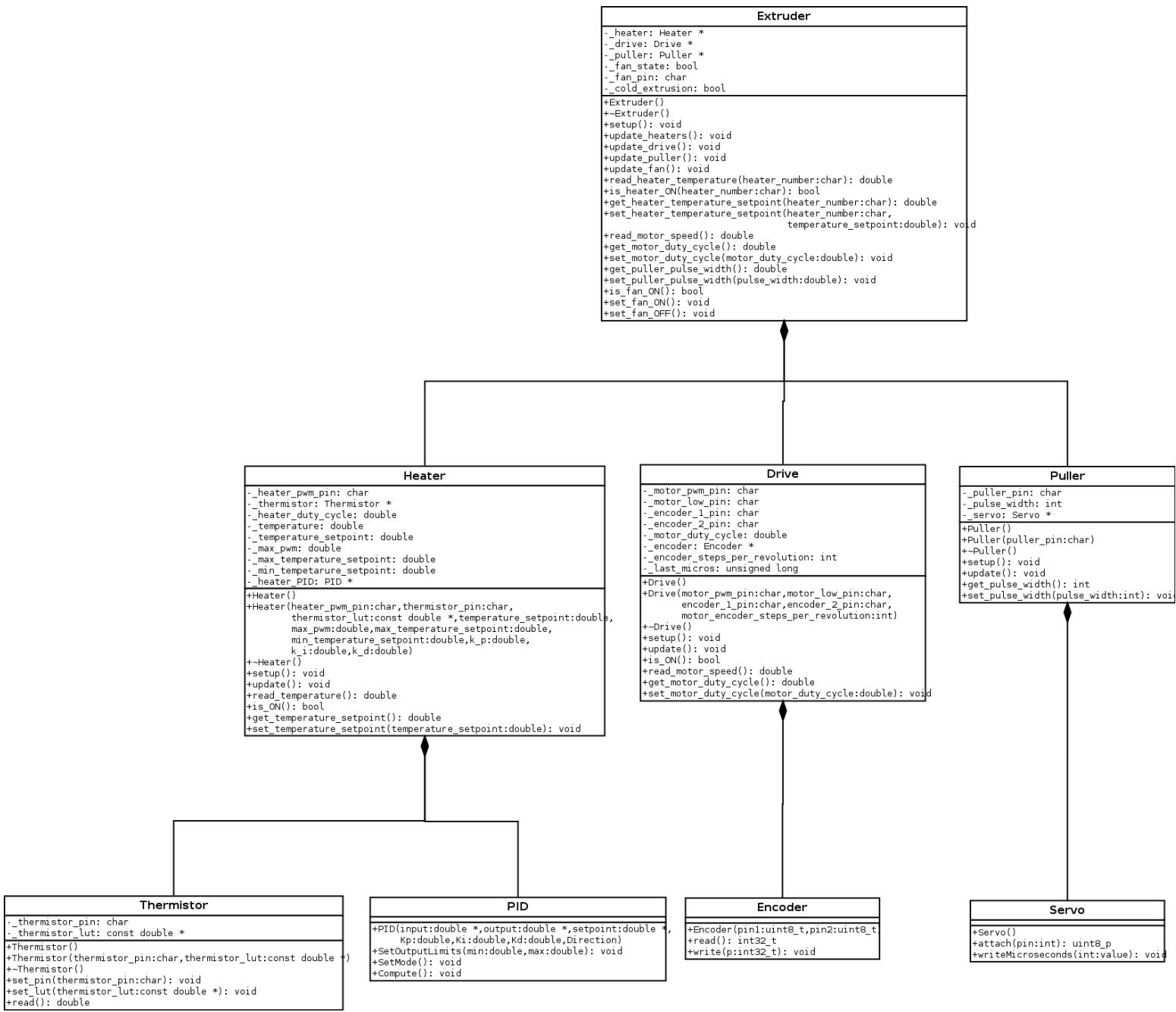
Sheet: /
File: heater_module_electronics.sch

Title: Heater Module Electronics

Size: A4	Date:
KiCad EDA	eeschema (2014-03-01 BZR 4730)-product
	Rev: 1
4	5

6	1/1
---	-----

6.3 Diagrama UML de la librería Extruder



6.4 Lista de materiales

#	Nombre	Cant.	Proveedor	Ref.	Precio unitario	Precio total
1	Barrena para madera 16x400mm	1	Leroy Merlin	13700204	12.75€	12.75€
2	Motor DC con caja de engranajes y encoder	1	Phidgets	3273E_0	73.55€	73.55€
3	Tapón tubería NPS 1/2" STD	1	Leroy Merlin	-	1.85€	1.85€
4	Acoplamiento tubería NPS 1/2" STD	1	AmazonSupply	4452K114	4.67€	4.67€
5	Tubo roscado NPS 1/2" STD	1	AmazonSupply	4548K181	10.00€	10.00€
6	Brida tubería NPS 1/2" STD 254 mm	1	AmazonSupply	44695K11	20.19€	20.19€
7	Casquillo para eje de 5/8" (15.875mm)	1	AmazonSupply	7811K32	2.96€	2.96€
8	Casquillo con flanco para eje de 10mm	1	AmazonSupply	5448T6	3.32€	3.32€
9	Rodamiento axial	1	AmazonSupply	5909K11	2.60€	2.60€
10	Perfil V-slot 20x80 mm, 1000mm	1	OpenBuilds	-	14.66€	14.66€
11	T-nuts [bolsa de 25]	2	OpenBuilds	-	3.30€	6.60€
12	Driver para motor DC, MC33926 Motor Driver Carrier	1	Pololu	1212	12.94€	12.94€
13	Arduino Mega 2560 R3 (compatible)	1	DealExtreme	256335	12.41€	12.41€
14	Escudo de prototipado para Arduino Mega	1	eBay (etang_uk)	-	6.91€	6.91€
15	Pantalla LCD con encoder	1	GADGETS 3D	-	38.05€	38.05€
16	Conector macho 10 pines	2	Conectrol	-	0.12€	0.24€
17	Tiras de pines macho, paso 2.54mm	2	Conectrol	-	0.40€	0.80€
18	Placa de tiras 100x100mm	1	Conectrol	-	5.06€	5.06€
19	EPCOS 100K NTC Thermistor, B57560G1104F	3	RS	769-1934	2.54€	7.62€

20	Resistencia 460 Ohm	3	Conectrol	-	0.01€	0.03€
21	Transistor MOSFET IRL540N	4	Conectrol	IRL540N	0.67€	2.68€
22	Diodo de libre circulación RHP1560	3	Conectrol	RHP1560	0.55€	1.65€
23	Clemas 2 entradas, 2.54mm	5	Conectrol	-	0.19€	0.95€
24	Resistencias 100Ohm	4	Conectrol	-	0.01€	0.04€
25	Resistencias 10kOhm	4	Conectrol	-	0.01€	0.04€
26	Clemas metálicas	6	Conectrol	-	0.05€	0.30€
27	Hilo de <i>nicrome</i> , 10Ohm/m [venta por metros]	3.6	Conectrol	-	2.54€	9.14€
28	Aislante lana de vidrio [lámina]	1	eBay (prestigeclearing house)	-	5.53€	5.53€
29	Cinta kapton [rollo]	1	Moebyus Machines	-	5.95€	5.95€
30	Aislante termico, lámina corcho	1	eBay (israh69)	-	2.50€	2.50€
31	Fuente de alimentación	1	eBay (tirasled)	-	32.79€	32.79€
32	Convertidor DC/DC LM2596	2	eBay (19mogu85)	-	2.55€	5.10€
33	Servo rotación continua SM-S4303R	1	Pololu	1212	9.49€	9.49€
34	Rodamiento de bolas 625-2RS	1	RS	618-9878	1.46€	1.46€
35	Ventilador 24V 60x60x10	2	eBay (it_tronics)	-	5.80€	11.60€
36	Filamento PLA para impresión 3d [bobinas de 1kg]	1	Sun Ya Tech	-	20.00€	20.00€
37	Tornillos M5x10	30	Tornicalvo SL	-	0.04€	1.20€
38	Tornillos M3x16	20	Tornicalvo SL	-	0.15€	3.00€
39	Tornillos M3x20	5	Tornicalvo SL	-	0.18€	0.90€
40	Tornillos M3x35	10	Tornicalvo SL	-	0.31€	3.10€
41	Arandelas M3	35	Tornicalvo SL	-	0.02€	0.70€
42	Tuercas M3	35	Tornicalvo SL	-	0.06€	2.10€

43	Tornillos M14x35	4	Tornicalvo SL	-	1.00€	4.00€
44	Arandelas M14	4	Tornicalvo SL	-	0.08€	0.32€
45	Tuercas M14	4	Tornicalvo SL	-	0.25€	1.00€
46	Bridas [bolsa]	1	Leroy Merlin	-	2.25€	2.25€
47	Cables [aproximado]	1	Conectrol	-	10.00€	10.00€

Total: 375.00€

6.5 Pruebas de calidad de filamento

Datos de la muestra

Modelo	-
Fecha	2014-05-29 10:25
Boquilla	-
Velocidad motor	-
Velocidad puller	-
Temperatura	-
Refrigeración	-

Notas
Prueba de filamento comercia, Sun Ya Tech 3mm

Procedimiento	Medidas cada 0.5m
---------------	-------------------

Toma de datos

Muestra	Diámetro [mm]
1	2.90
2	2.91
3	2.95
4	2.98
5	2.99
6	2.90
7	3.02
8	2.98
9	2.99
10	2.98

Defectos visuales

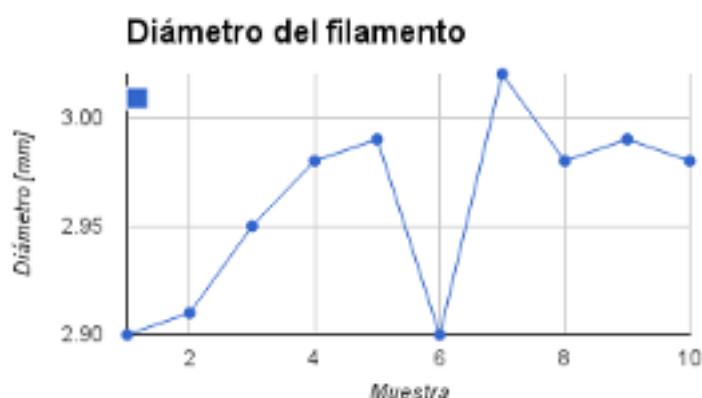
Masa total [g]	-
----------------	---

Resultados

Capacidad [kg/h]

#VALUE!

Diámetro medio [mm]	2.960	
Máximo [mm]	3.020	
Mínimo [mm]	2.900	
Delta diámetro [mm]	0.120	
Mitad de delta diámetro [mm]	0.060	
Tolerancia nominal [mm]	3.000	± 0.100
Tolerancia sobre valor medio [mm]	2.960	± 0.060



Datos de la muestra

Modelo	Prototipo
Fecha	2014-07-28
Boquilla	4mm
Velocidad motor	?
Velocidad puller	?
Temperatura	?
Refrigeración	Si

Notas

Primera prueba con el prototipo

Procedimiento	Tomar 10 medidas del diámetro, una cada 30 segundos. Al final medir la longitud total extruida.
---------------	---

Toma de datos

Muestra	Diámetro [mm]
1	2.52
2	2.51
3	2.67
4	2.71
5	2.88
6	2.57
7	3.24
8	2.75
9	3.04
10	2.83

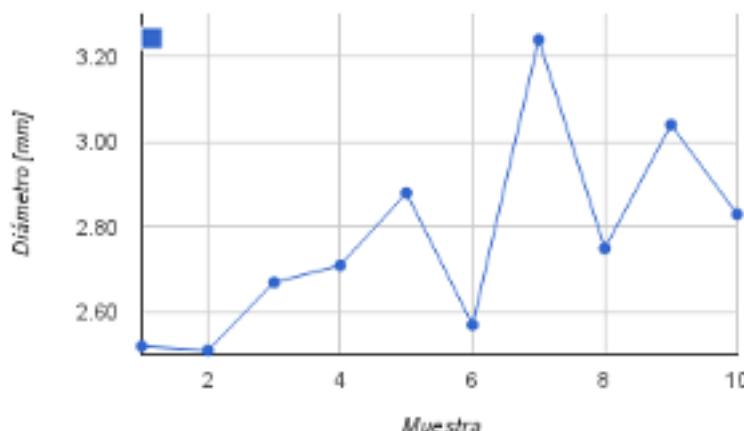
Longitud total [mm]	-
---------------------	---

Resultados

Throughput [kg/h] #VALUE!

Average Diameter	2.772	
Maximum	3.240	
Minimum	2.510	
Delta Diameter	0.730	
Half Delta Diameter	0.365	
Nominal grading	3.000	0.490
AVG grading	2.772	0.468

Diámetro del filamento



Datos de la muestra

Modelo	Prototipo
Fecha	2014-08-16 15:06
Boquilla	4mm
Velocidad motor [rpm]	18
Velocidad puller [rpm]	85°
Temperatura	230°
Refrigeración	Sí

Notas
Ventilador en vertical a 20mm de la boquilla
Puller a 210mm de la boquilla
Puller sin goma
Sin guías de filamento

Procedimiento	Tomar 10 medidas del diámetro, una cada 30 segundos. Al final medir la longitud total extruida.
---------------	---

Toma de datos

Muestra	Diámetro [mm]
1	2.96
2	2.60
3	2.69
4	3.08
5	3.22
6	3.36
7	2.77
8	2.59
9	3.38
10	2.91

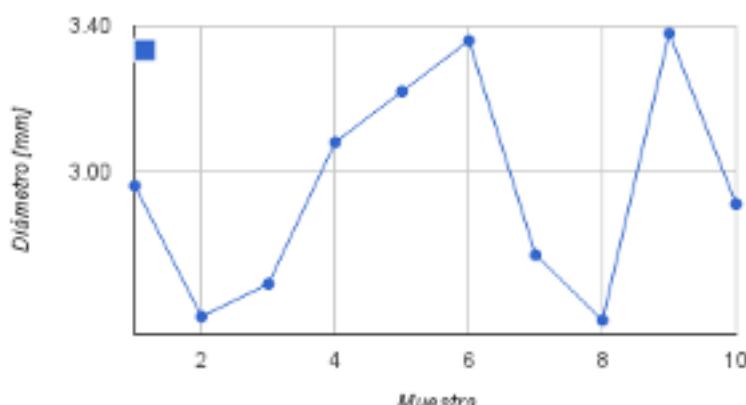
Defectos visuales
Aspecto OK
Superficie lisa y color uniforme

Longitud total [mm]	1780
Masa total [g]	14

Resultados

Throughput [kg/h] from I	0.17
Throughput [kg/h] from m	0.19
Average Diameter	2.956
Maximum	3.380
Minimum	2.590
Delta Diameter	0.790
Half Delta Diameter	0.395
Nominal grading	3.000
AVG grading	2.956
	0.410
	0.424

Diámetro del filamento



Datos de la muestra

Modelo	Prototipo
Fecha	2014-08-16 15:06
Boquilla	4mm
Velocidad motor [rpm]	18
Velocidad puller [rpm]	85°
Temperatura	230°
Refrigeración	Sí

Notas
Ventilador en vertical a 20mm de la boquilla
Puller a 210mm de la boquilla
Puller sin goma
Sin guías de filamento

Procedimiento	Tomar 10 medidas del diámetro, una cada 30 segundos. Al final medir la longitud total extruida.
---------------	---

Toma de datos

Muestra	Diámetro [mm]
1	2.96
2	2.60
3	2.69
4	3.08
5	3.22
6	3.36
7	2.77
8	2.59
9	3.38
10	2.91

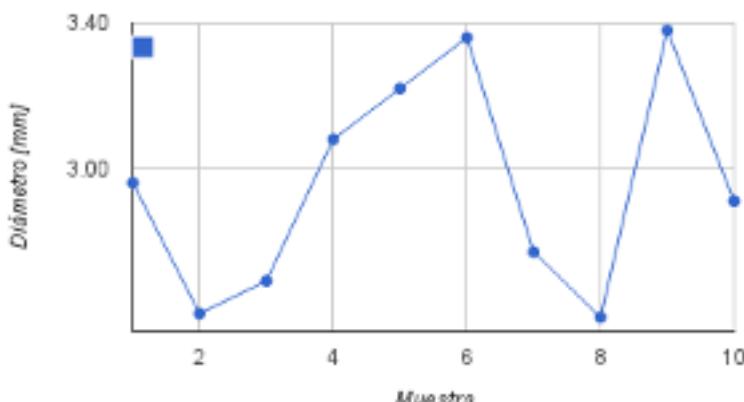
Defectos visuales
Aspecto OK
Superficie lisa y color uniforme

Longitud total [mm]	1780
Masa total [g]	14

Resultados

Throughput [kg/h] from I	0.17
Throughput [kg/h] from m	0.19
Average Diameter	2.956
Maximum	3.380
Minimum	2.590
Delta Diameter	0.790
Half Delta Diameter	0.395
Nominal grading	3.000
AVG grading	2.956
	0.410
	0.424

Diámetro del filamento



Datos de la muestra

Modelo	Prototipo
Fecha	2014-08-16 16:16
Boquilla	4mm
Velocidad motor [rpm]	18
Velocidad puller [rpm]	85°
Temperatura	230°
Refrigeración	Sí

Notas
Ventilador en vertical a 20mm de la boquilla
Puller a 210mm de la boquilla
Puller sin goma
Sin guías de filamento

Procedimiento	Tomar 10 medidas del diámetro, una cada 30 segundos. Al final medir la longitud total extruida.
---------------	---

Toma de datos

Muestra	Diámetro [mm]
1	2.84
2	3.18
3	3.41
4	3.14
5	3.00
6	3.42
7	3.00
8	2.94
9	2.81
10	3.25

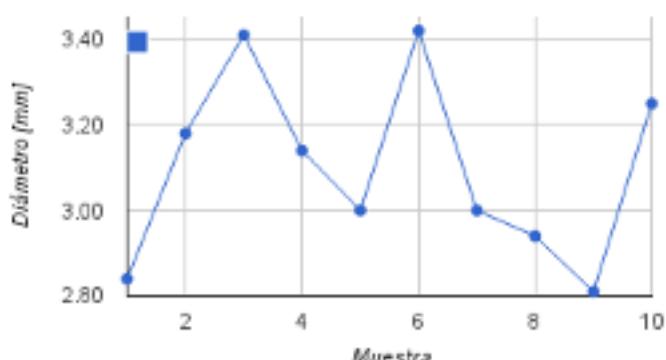
Defectos visuales
Aspecto OK
Superficie lisa y color uniforme

Longitud total [mm]	1790
Masa total [g]	15

Resultados

Throughput [kg/h] from I	0.19
Throughput [kg/h] from m	0.20
Average Diameter	3.099
Maximum	3.420
Minimum	2.810
Delta Diameter	0.610
Half Delta Diameter	0.305
Nominal grading	3.000
AVG grading	0.420 0.321

Diámetro del filamento



Datos de la muestra

Modelo	Prototipo
Fecha	2014-08-16 18:21
Boquilla	4mm
Velocidad motor [rpm]	18
Velocidad puller [rpm]	85°
Temperatura	230°
Refrigeración	Sí

Notas
Ventilador en vertical a 20mm de la boquilla
Puller a 210mm de la boquilla
Puller sin goma
Sin guías de filamento

Procedimiento	Tomar 10 medidas del diámetro, una cada 30 segundos. Al final medir la longitud total extruida.
---------------	---

Toma de datos

Muestra	Diámetro [mm]
1	3.11
2	3.21
3	2.68
4	3.08
5	3.23
6	3.09
7	2.89
8	3.10
9	2.66
10	2.56

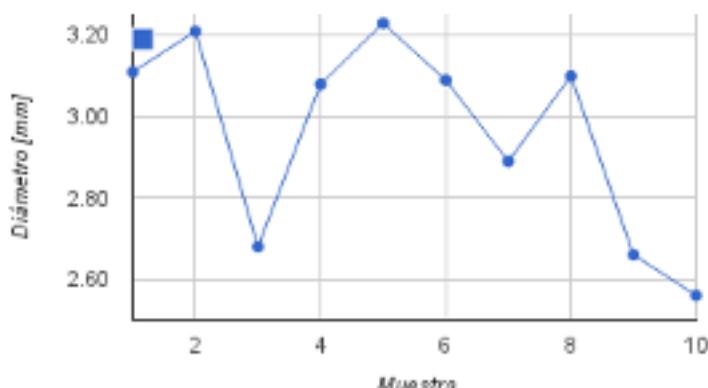
Defectos visuales
Aspecto OK
Superficie lisa y color uniforme

Longitud total [mm]	1830
Masa total [g]	14

Resultados

Throughput [kg/h] from I	0.18
Throughput [kg/h] from m	0.19
Average Diameter	2.961
Maximum	3.230
Minimum	2.560
Delta Diameter	0.670
Half Delta Diameter	0.335
Nominal grading	3.000
AVG grading	0.440
	0.401

Diámetro del filamento



Datos de la muestra

Modelo	Prototipo con unibody
Fecha	2014-08-19 15:59
Boquilla	4mm
Velocidad motor [rpm]	18
Velocidad puller [rpm]	85°
Temperatura	230°
Refrigeración	Sí, 2x24V

Notas

Prueba del puller con gomas y las guías

Procedimiento	Tomar 10 medidas del diámetro, una cada 30 segundos. Al final medir la longitud total extruida.
---------------	---

Toma de datos

Muestra	Diámetro [mm]
1	2.62
2	2.53
3	2.69
4	2.97
5	2.66
6	2.55
7	2.55
8	2.82
9	2.48
10	2.71

Defectos visuales

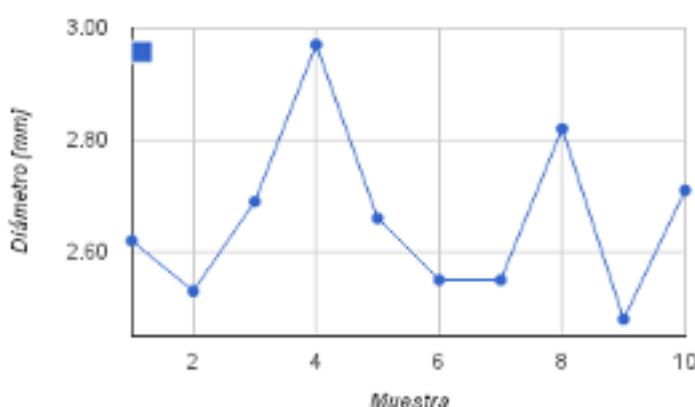
Aspecto OK
Superficie lisa y color uniforme

Masa total [g]	14
----------------	----

Resultados

Capacidad [kg/h]	0.19
Diámetro medio [mm]	2.658
Máximo [mm]	2.970
Mínimo [mm]	2.480
Delta diámetro [mm]	0.490
Mitad de delta diámetro [mm]	0.245
Tolerancia nominal [mm]	3.000 ± 0.520
Tolerancia sobre valor medio [mm]	2.658 ± 0.312

Diámetro del filamento



Datos de la muestra

Modelo	Final
Fecha	2014-09-14 14:41
Boquilla	4mm
Velocidad motor	30 rpm (75%)
Velocidad puller	1639 us
Temperatura	200° (multímetro)
Refrigeración	Si

Notas

Setpoints: 240/60/60

Procedimiento	Tomar 10 medidas del diámetro, una cada 30 segundos. Al final medir la longitud total extruida.
---------------	---

Toma de datos

Muestra	Diámetro [mm]
1	2.77
2	2.35
3	2.18
4	2.67
5	3.08
6	2.27
7	2.75
8	2.80
9	2.48
10	2.52

Defectos visuales

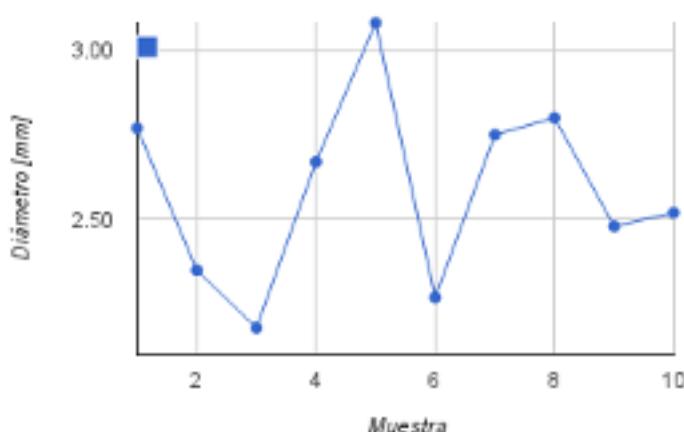
Aspecto OK
Superficie lisa y color uniforme

Masa total [g]	20
----------------	----

Resultados

Capacidad [kg/h]	0.27
Diámetro medio [mm]	2.587
Máximo [mm]	3.080
Mínimo [mm]	2.180
Delta diámetro [mm]	0.900
Mitad de delta diámetro [mm]	0.450
Tolerancia nominal [mm]	3.000 ± 0.820
Tolerancia sobre valor medio [mm]	2.587 ± 0.493

Diámetro del filamento



Datos de la muestra

Modelo	Final
Fecha	2014-09-14 15:04
Boquilla	4mm
Velocidad motor	30 rpm
Velocidad puller	1639 us
Temperatura	200° (multímetro)
Refrigeración	Si

Notas
Setpoints: 240/60/60

Procedimiento	Tomar 10 medidas del diámetro, una cada 30 segundos. Al final medir la longitud total extruida.
---------------	---

Toma de datos

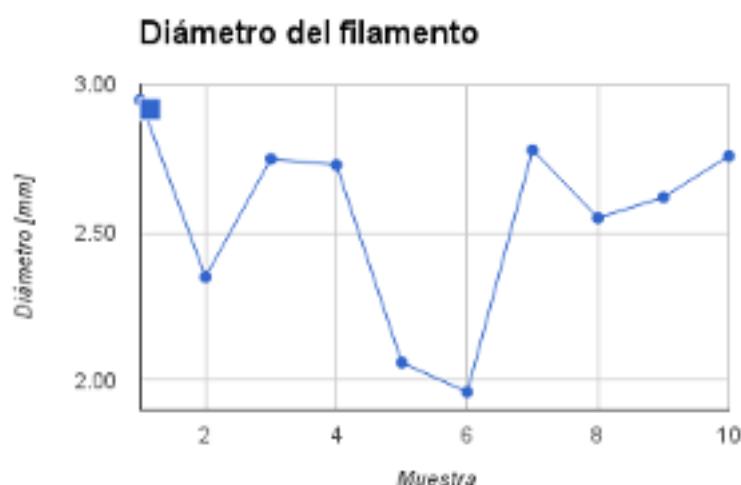
Muestra	Diámetro [mm]
1	2.95
2	2.35
3	2.75
4	2.73
5	2.06
6	1.96
7	2.78
8	2.55
9	2.62
10	2.76

Defectos visuales
Aspecto OK
Superficie lisa y color uniforme

Masa total [g]	20
----------------	----

Resultados

Capacidad [kg/h]	0.27
Diámetro medio [mm]	2.551
Máximo [mm]	2.950
Mínimo [mm]	1.960
Delta diámetro [mm]	0.990
Mitad de delta diámetro [mm]	0.495
Tolerancia nominal [mm]	3.000 ± 1.040
Tolerancia sobre valor medio [mm]	2.551 ± 0.591



Datos de la muestra

Modelo	Final
Fecha	2014-09-14 15:19
Boquilla	4mm
Velocidad motor	12 rpm
Velocidad puller	1639 us
Temperatura	200° (multímetro)
Refrigeración	Si

Notas

Prueba de baja velocidad

Procedimiento	Tomar 10 medidas del diámetro, una cada 30 segundos. Al final medir la longitud total extruida.
---------------	---

Toma de datos

Muestra	Diámetro [mm]
1	2.79
2	2.77
3	1.92
4	2.31
5	1.40
6	2.75
7	1.61
8	2.96
9	1.93
10	1.48

Defectos visuales

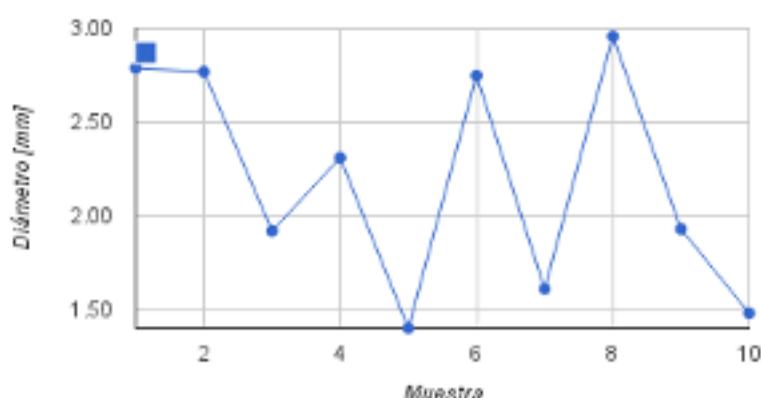
Aspecto OK
Superficie lisa y color uniforme
Detectadas fluctuaciones muy importantes cada aprox. 30s.
Consultar Polymer Extrusion, página 535.

Masa total [g]	6
----------------	---

Resultados

Capacidad [kg/h]	0.08
Diámetro medio [mm]	2.192
Máximo [mm]	2.960
Mínimo [mm]	1.400
Delta diámetro [mm]	1.560
Mitad de delta diámetro [mm]	0.780
Tolerancia nominal [mm]	3.000 ± 1.600
Tolerancia sobre valor medio [mm]	2.192 ± 0.792

Diámetro del filamento



Datos de la muestra

Modelo	Final
Fecha	2014-09-14 18:52
Boquilla	4mm
Velocidad motor	36rpm
Velocidad puller	1663 us
Temperatura	200°
Refrigeración	Si

Notas

Prueba de 2 zonas de fundido y a máxima capacidad (240/240/60)

Procedimiento	Tomar 10 medidas del diámetro, una cada 30 segundos. Al final medir la longitud total extruida.
---------------	---

Toma de datos

Muestra	Diámetro [mm]
1	2.83
2	3.26
3	1.93
4	2.74
5	3.36
6	2.12
7	2.70
8	2.82
9	3.52
10	2.35

Defectos visuales

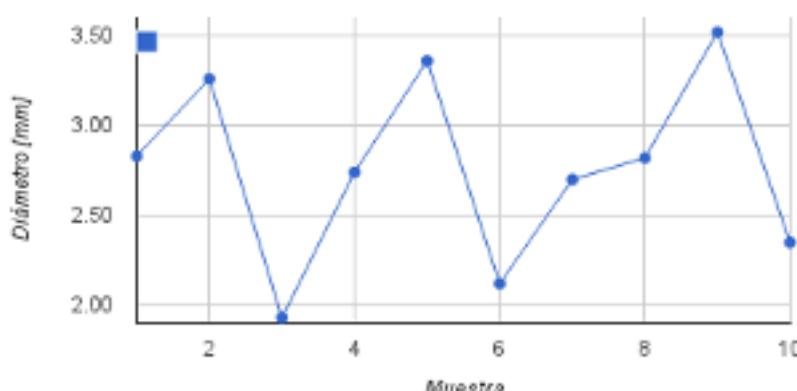
Aspecto OK

Masa total [g]	29
----------------	----

Resultados

Capacidad [kg/h]	0.39
Diámetro medio [mm]	2.763
Máximo [mm]	3.520
Mínimo [mm]	1.930
Delta diámetro [mm]	1.590
Mitad de delta diámetro [mm]	0.795
Tolerancia nominal [mm]	3.000 ± 1.070
Tolerancia sobre valor medio [mm]	2.763 ± 0.833

Diámetro del filamento



Datos de la muestra

Modelo	Final
Fecha	2014-09-14 18:52
Boquilla	4mm
Velocidad motor	36rpm
Velocidad puller	1663 us
Temperatura	200°
Refrigeración	Si

Notas

Prueba de 2 zonas de fundido y a máxima capacidad (240/240/60). Igual que 18:52 pero manteniendo siempre la tolva llena

Procedimiento	Tomar 10 medidas del diámetro, una cada 30 segundos. Al final medir la longitud total extruida.
---------------	---

Toma de datos

Muestra	Diámetro [mm]
1	2.44
2	2.33
3	3.62
4	2.33
5	2.03
6	2.47
7	2.53
8	2.63
9	3.11
10	2.12

Defectos visuales

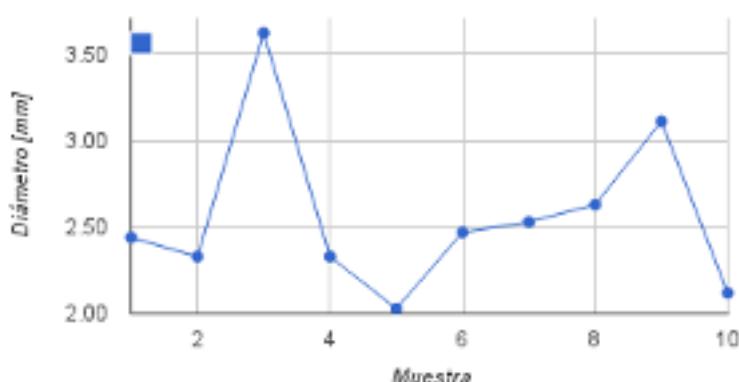
Aspecto OK

Masa total [g]	29
----------------	----

Resultados

Capacidad [kg/h]	0.39
Diámetro medio [mm]	2.561
Máximo [mm]	3.620
Mínimo [mm]	2.030
Delta diámetro [mm]	1.590
Mitad de delta diámetro [mm]	0.795
Tolerancia nominal [mm]	3.000 ± 0.970
Tolerancia sobre valor medio [mm]	2.561 ± 1.059

Diámetro del filamento



Datos de la muestra

Modelo	Final
Fecha	2014-09-14 19:34
Boquilla	4mm
Velocidad motor	36rpm
Velocidad puller	1663 us
Temperatura	200° (multímetro)
Refrigeración	Si

Notas

Prueba con 3 zonas de fundido
(240/240/240)

Procedimiento	Tomar 10 medidas del diámetro, una cada 30 segundos. Al final medir la longitud total extruida.
---------------	---

Toma de datos

Muestra	Diámetro [mm]
1	2.09
2	2.82
3	2.93
4	2.23
5	2.73
6	3.51
7	2.06
8	2.81
9	2.18
10	2.60

Defectos visuales

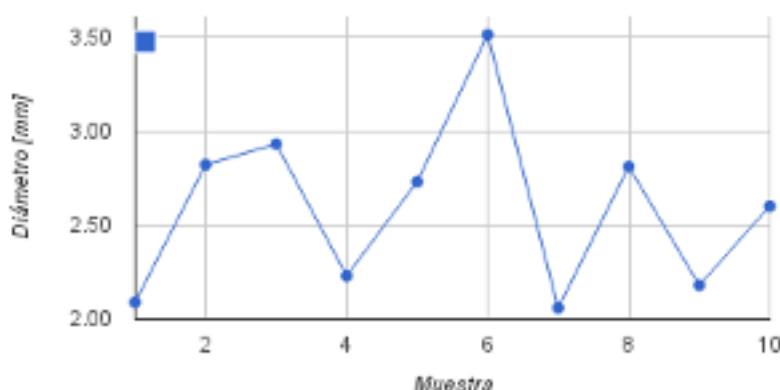
Aspecto OK

Masa total [g]	30
----------------	----

Resultados

Capacidad [kg/h]	0.40	
Diámetro medio [mm]	2.596	
Máximo [mm]	3.510	
Mínimo [mm]	2.060	
Delta diámetro [mm]	1.450	
Mitad de delta diámetro [mm]	0.725	
Tolerancia nominal [mm]	3.000	± 0.940
Tolerancia sobre valor medio [mm]	2.596	± 0.914

Diámetro del filamento



Datos de la muestra

Modelo	Final
Fecha	2014-09-14 19:42
Boquilla	4mm
Velocidad motor	36rpm
Velocidad puller	1663 us
Temperatura	200° (multímetro)
Refrigeración	Si

Notas

Prueba con 3 zonas de fundido
(igual que 2014-09-14 19:34)

Procedimiento	Tomar 10 medidas del diámetro, una cada 30 segundos. Al final medir la longitud total extruida.
---------------	---

Toma de datos

Muestra	Diámetro [mm]
1	3.14
2	2.26
3	2.20
4	2.26
5	2.21
6	2.57
7	2.71
8	2.35
9	2.18
10	2.65

Defectos visuales

Aspecto OK

Masa total [g]	30
----------------	----

Resultados

Capacidad [kg/h]	0.40
Diámetro medio [mm]	2.453
Máximo [mm]	3.140
Mínimo [mm]	2.180
Delta diámetro [mm]	0.960
Mitad de delta diámetro [mm]	0.480
Tolerancia nominal [mm]	3.000 ± 0.820
Tolerancia sobre valor medio [mm]	2.453 ± 0.687

Diámetro del filamento

