



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**ANÁLISIS DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE  
FILAMENTO PLÁSTICO PARA IMPRESIÓN 3D  
UTILIZANDO UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE  
BAJO COSTE**

**Autor:**

**García Sanz, Daniel**

**Tutor:**

**Mansilla Gallo, Alberto  
Área Ingeniería Mecánica  
Dpto. CMeIM, EGI, IM, IPF**

**Valladolid, Julio 2022.**



# AGRADECIMIENTOS

A mis padres y mi hermano por apoyarme en todo momento y acompañarme en el camino.

A mis compañeros de laboratorio: Luis, Pablo, Mario, Álvaro, Marina, Lucía, Víctor, Javi y Rodrigo; por ayudarme con todos los problemas que me han ido surgiendo y convertirse poco a poco en casi una familia.

A Eduardo y Roy por toda la ayuda prestada en el laboratorio.

A Alberto por darme la oportunidad de embarcarme en este Proyecto.

A mis amigos por acompañarme todos estos años y ser un apoyo incondicional todo este tiempo.

A todos vosotros, muchas gracias.



# Resumen

En este proyecto se abordará la fabricación de filamento de calidad a partir de pellets/gránulos de plástico virgen, mediante la utilización de una máquina extrusora de bajo coste para su posterior uso en impresión 3D.

El trabajo constará del análisis de los parámetros de operación (temperatura, velocidad del husillo, refrigeración) más importantes en un proceso de extrusión para observar de qué manera influyen en la calidad final del filamento obtenido y en las propiedades de las piezas fabricadas mediante impresión 3D.

Una vez realizados los diferentes experimentos se llevarán a cabo los ensayos a flexión de las probetas obtenidas por impresión 3D para cada uno de los experimentos para así poder caracterizar los diferentes materiales empleados.

Finalmente se detallarán las conclusiones a las que se ha llegado tras los experimentos, así como las posibles líneas futuras que se podrían seguir.

**Palabras clave:** extrusión, plástico, filamentadora, impresión 3D, reciclado.

# Abstract

On this project, the manufacture of quality filament from virgin plastic pellets/granules, using a low-cost extruder machine for subsequent use in 3D printing, will be approached.

The work will consist on the analysis of the most important operating parameters (temperature, screw speed, cooling) in an extrusion process in order to observe how they influence the final quality of the filament obtained and the properties of the parts manufactured by 3D printing.

Once the different experiments have been carried out, flexural tests will be carried out on the specimens obtained by 3D printing for each of the experiments in order to characterize the different materials used.

Finally, the conclusions reached after the experiments will be detailed, as well as the possible future lines that could be followed.

**Keywords:** extrusion, plastic, filament machine, 3D printing, recycling.





## ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Introducción .....	2
1.2. Objetivos .....	4
1.3. Estructura.....	4
CAPÍTULO II: ESTADO DE LA TÉCNICA .....	7
2.1. Proceso de extrusión.....	8
2.2. Tipos de extrusores .....	10
2.3. Componentes de un extrusor .....	11
2.4. Variables más importantes del proceso de extrusión .....	15
2.5. Propiedades de los materiales plásticos en extrusión .....	18
2.6. Filamentadoras de bajo coste en el mercado.....	26
CAPÍTULO III: FABRICACIÓN DE FILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D .....	33
3.1. Impresión 3D .....	34
3.2. Materiales utilizados .....	35
3.3. Máquina de secado: Airid Polymer Dryer .....	37
3.4. Máquina extrusora de filamento: Filament Maker Precision 350 .....	39
3.5. Experimentos realizados.....	45
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DEL FILAMENTO OBTENIDO .....	61
4.1. Equipo de Impresión 3D .....	62
4.2. Máquina de ensayos .....	65
4.3. Análisis de filamento PLA (3devo).....	68
4.4. Análisis de filamento de PLA (Smartmaterials 3D) .....	73
4.5. Análisis de filamento de PLA comercial .....	81
4.6. Análisis de filamento de PP .....	82
Capítulo V: Conclusiones y líneas futuras .....	87
5.1. Conclusiones Finales .....	88
5.2. Líneas futuras.....	89
CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFÍA .....	91
Bibliografía.....	92



CAPÍTULO VII: ANEXOS..... 95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tasa de uso de materiales circulares en la Unión Europea (2020) Fuente [2].....2
Figura 2. Esquema de Economía circular para el proceso de Impresión 3D. (Fuente Propia) .....3
Figura 3. Diagrama del proceso de obtención de pieza impresa en 3D a partir de pellet (Fuente Propia).....3
Figura 4. Esquema simplificado del proceso de extrusión de plásticos para la obtención de filamento para impresión 3D. Fuente [4] .....8
Figura 5. Extrusora monohusillo. Fuente [5] ..... 10
Figura 6. Extrusora de doble husillo corrotante. Fuente [5]..... 10
Figura 7. Extrusora de Pistón. Fuente [5] ..... 10
Figura 8. Esquema simplificado de los componentes principales de una extrusora monohusillo industrial. Fuente [3] ..... 11
Figura 9. Geometría preferida para la apertura de la garganta de alimentación. Fuente [5]..... 11
Figura 10. Buen diseño de tolva (izda) y mal diseño de tolva (dcha). Fuente [5] ..... 12
Figura 11. Alimentador vibratorio. Fuente [6] ..... 12
Figura 12. Estructuras de cohesión más comunes. Fuente [6] ..... 12
Figura 13. Tornillo sinfín de un solo tramo. Fuente [5] ..... 13
Figura 14. Barrel con apertura de ventilación y tornillo de dos etapas. Fuente [5] ..... 13
Figura 15. Extrusora con calentadores y refrigeradores por aire. Fuente [5] . 14
Figura 16. Efecto de la variación de la presión de entrada de la matriz en la variación dimensional del material extruido. Fuente [5] ..... 16
Figura 17. Transductor de presión ..... 16
Figura 18. Diferentes tipos de sondas de temperatura. Fuente [5] ..... 17
Figura 19. Medida de la temperatura de fusión mediante infrarrojos a través de un cristal de zafiro. Fuente [5] ..... 17
Figura 20. Estructura química del polipropileno (Monómero de propileno (izda.) y cadena de polipropileno (dcha.)). Fuente [4]..... 18
Figura 21. Estructura de un polímero amorfo. Fuente [4]..... 19
Figura 22. Estructura de un polímero semicristalino. Fuente [4] ..... 19
Figura 23. Velocidad de cizallamiento frente a viscosidad. Fuente [4]..... 21





Figura 24. Esquema de un reómetro capilar. Fuente [5].....	22
Figura 25. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad. Fuente [5].....	23
Figura 26. Filastruder kit Fuente [7].....	27
Figura 27. Filawinder Fuente [7].....	27
Figura 28. Felfil EVO (izda) y Felfil Spooler (centro y dcha.) Fuente [8] .....	28
Figura 29. Filamentadora Protocycler + Fuente [9].....	28
Figura 30. Filabot EX6 Filament extruder (dcha.) Filabot Airpath (centro) Filabot Spooler (izda.) Fuente [10] .....	29
Figura 31. Componentes de la Filafab PRO 350 EX Series Fuente [11] .....	30
Figura 32. Wellzoom C Extruder (dcha.), Water Cooling Tractor (centro) Auto- Winder (izda.) Fuente [12].....	31
Figura 33. Xcalibur Extruder (dcha.), sistema de enfriamiento (centro) y sistema de medición, guiado y bobinado (izda.) Fuente [13].....	31
Figura 34. Esquema del proceso de impresión FDM. Fuente [14].....	34
Figura 35. Diagrama de flujo para imprimir una pieza en 3D Fuente [28].....	35
Figura 36. Unidad estructural del PLA [17].....	35
Figura 37. Obtención del polipropileno a partir de la polimerización del propileno. [19].....	36
Figura 38. Pellets de PLA (izda), PETG(centro) y PP(dcha) Fuente Propia .....	37
Figura 39. Máquina de secado de polímeros Airid Polymer Dryer Fuente [22] .....	38
Figura 40. Interfaz del usuario (Airid Polymer Dryer) Fuente [22].....	39
Figura 41. Extrusoras de filamento 3devo (Composer y Precision Series) Fuente [22].....	39
Figura 42. Partes de la filamentadora 3devo Precision 350 Fuente [22] .....	40
Figura 43. Panel de control Fuente [22] .....	40
Figura 44. Tolva con rejilla (izda.) y tolva sin rejilla (dcha.). Fuente Propia .....	41
Figura 45. Vista superior e inferior de la boquilla (fuente propia).....	41
Figura 46. Sistema motor-reductora/sinfín/cilindro (fuente propia) .....	41
Figura 47. Tornillo sinfín Fuente [22] .....	42
Figura 48. Orientación recomendada de los ventiladores (Fuente propia) .....	42
Figura 49. Sensor óptico y sistema de arrastre Fuente [22] .....	43
Figura 50. Posicionador de filamento Fuente [22].....	43
Figura 51. Sistema de bobinado de filamento (izda.) y embrague deslizante (dcha.) Fuente propia.....	44
Figura 52. Pantalla de visualización de la Interfaz del software Devovision. Gráfica del diámetro del filamento. (Fuente propia) .....	44
Figura 53. Proceso de purga de la filamentadora Fuente Propia.....	47
Figura 54. Gráficas del diámetro de filamento, velocidad del husillo, corriente del motor y velocidad el extractor (PLA 1,75 mm) Fuente Propia .....	48
Figura 55. Gráficas del diámetro de filamento, velocidad del husillo, corriente del motor y velocidad el extractor (PLA 2,85mm) Fuente propia .....	49



Figura 56. Gráficas del diámetro de filamento, velocidad del husillo, corriente del motor y velocidad el extractor (PETG 1,75 mm) Fuente propia ..... 50

Figura 57. PLA degradado que provocó el accidente Fuente propia ..... 51

Figura 58. Material de purga mezclado con plástico degradado. Fuente propia ..... 52

Figura 59. Devoclean MidTemp (izda.) y Devoclean HighTemp (dcha.) Fuente propia ..... 52

Figura 60. Purga de alto nivel. Fuente propia ..... 53

Figura 61. Corriente del motor después de la purga de alto nivel. Fuente propia ..... 53

Figura 62. Desmontaje de la filamentadora paso a paso. Fuente propia ..... 54

Figura 63. Tornillo sinfín contaminado. Fuente propia ..... 54

Figura 64. Tornillo sinfín carbonizado (izda) y tornillo sinfín limpio y pulido (dcha) Fuente propia ..... 55

Figura 65. Fresadora con cabezal puesto para pulir el husillo Fuente propia 55

Figura 66 . Flujo de PP a 190 °C (izda.) y a 170 °C (dcha.) ..... 57

Figura 67. Esquema del cambio en la estructura del polímero durante el proceso de extrusión [6] ..... 58

Figura 68. Comparación entre filamento de PP aplastado y filamento redondo Fuente propia ..... 59

Figura 69. Prototipo de ventilación circular Fuente propia ..... 59

Figura 70. Impresora 3D Creality CR-10 Fuente propia ..... 62

Figura 71. Figura 63. Impresora 3D Tumaker NX Pro Dual Fuente propia ..... 63

Figura 72. Vista previa de las probetas en Ultimaker Cura Fuente propia ..... 63

Figura 73. Geometría de las probetas ..... 63

Figura 74. Ensayos de tracción en 2 probetas impresas en diferentes direcciones Fuente [24] ..... 64

Figura 75. Máquina de ensayos Mark-10 ES30 con útiles para flexión Fuente Propia ..... 65

Figura 76. Esquema del ensayo a flexión Fuente Propia ..... 66

Figura 77. Gráficas de fuerza y desplazamiento obtenidas en Labview durante uno de los ensayos. Fuente Propia ..... 66

Figura 78. Realización de uno de los ensayos a flexión Fuente Propia ..... 66

Figura 79. Curvas típicas de esfuerzo de flexión ( $\sigma_f$ ) frente a la deformación ( $\epsilon_f$ ) y flecha s Fuente [25] ..... 67

Figura 80. Gráficas del diámetro de filamento, velocidad del husillo, corriente del motor y velocidad el extractor (PLA 3devo 1,75mm Exp.2) Fuente Propia 68

Figura 81. Diámetro medido con calibre (Experimento 1 (izda), Experimento 2 (centro), Experimento 3 (dcha.)) (PLA 3devo) Fuente Propia ..... 69

Figura 82. Bobinas de PLA (3devo) obtenidas con la filamentadora (Fuente Propia) ..... 70



Figura 83. Pieza realizada mediante Impresión 3D con PLA (Experimento 1) (Fuente Propia).....	70
Figura 84. Filamento de PLA (2,85mm) con deformaciones curvas Fuente Propia.....	71
Figura 85. Probeta de PLA antes (izda) y después (dcha.) del ensayo a flexión. Fuente Propia .....	71
Figura 86. Impresión 3D de probetas con la Creality CR-10 Fuente Propia....	71
Figura 87. Gráficas Fuerza-Desplazamiento y Esfuerzo-Deformación (Exp 1 y 2 PLA 3devo) Fuente Propia .....	72
Figura 88. Gráficas de los diámetros de las bobinas obtenidas en los Experimentos 1,2 y 3 (PLA SmartMaterials 3D) Fuente Propia.....	73
Figura 89. Diámetro medido con calibre (Experimento 1 (izda), Experimento 2 (dcha.)) (PLA SmartMaterials 3D) Fuente Propia.....	74
Figura 90. Ejemplo de filamento de mala calidad debido a una mala mezcla del material en la extrusora (Exp. 3) Fuente Propia .....	75
Figura 91. Útiles fabricados mediante impresión 3D con las bobinas 1 y 2 Fuente Propia .....	75
Figura 92. Secadora de filamento para impresión 3D modelo SMART3D Fuente Propia .....	76
Figura 93. Gráficas de los diámetros de las bobinas obtenidas en los Experimentos 4,5 y 6 (PLA SmartMaterials 3D) Fuente Propia.....	77
Figura 94. Diámetro medido con calibre (Experimento 4 (izda), Experimento 5 (centro), Experimento 6 (dcha.)) (PLA SmartMaterials 3D) Fuente Propia .....	77
Figura 95. Bobinas de PLA (SmartMaterials 3D) obtenidas con la filamentadora. Fuente Propia .....	78
Figura 96. Piezas realizadas mediante Impresión 3D con las bobinas de los experimentos 5 y 6. Fuente Propia.....	78
Figura 97. Probeta de PLA mal impresa (Subextrusión) Fuente Propia.....	79
Figura 98. Corriente del motor de los experimentos 2 y 6 (PLA SmartMaterials 3D) Fuente Propia .....	80
Figura 99. Bobina de PLA comercial utilizada Fuente [23].....	81
Figura 100. Probetas de PLA comercial ensayadas Fuente Propia .....	81
Figura 101. Gráficas de los diámetros de las bobinas obtenidas en los Experimentos 4,5 y 6 (PLA SmartTMaterials 3D) Fuente Propia.....	82
Figura 102. Diámetro medido con calibre (Experimento 1 (izda), Experimentos 2 y 3 (centro), Experimento 4 (dcha.)) (PP) Fuente Propia.....	83
Figura 103. Bobinas de PP obtenidas con la filamentadora Fuente Propia....	84
Figura 104. Problemas de adherencia y “warping” encontrados durante la impresión del PP Fuente Propia.....	84
Figura 105. Probeta de PP durante el ensayo (izda.) y después del ensayo (dcha.) Fuente Propia.....	85
Figura 106. Corriente del motor del Experimento 4 (Fuente propia) .....	86



Figura 107. Molino de corte SM300 para la trituración de plásticos (Fuente Propia) .....	89
Figura 108. Piezas de PP antes(izda.) y después (dcha.) de la trituración. Fuente Propia.....	90
Figura 109. Gráficas del diámetro de filamento, velocidad del husillo, corriente del motor y velocidad el extractor (Experimentos 1, 2 y 3 PLA SmartMaterials) (Fuente Propia) .....	100
Figura 110. Gráficas del diámetro de filamento, velocidad del husillo, corriente del motor y velocidad el extractor (Experimentos 4, 5 y 6 PLA SmartMaterials) (Fuente Propia) .....	101
Figura 111. Gráficas del diámetro de filamento, velocidad del husillo, corriente del motor y velocidad el extractor (Experimentos 1 y 2 PP) (Fuente Propia) .....	102
Figura 112. Gráficas del diámetro de filamento, velocidad del husillo, corriente del motor y velocidad el extractor (Experimentos 3 y 4 PP) (Fuente Propia) .....	103
Figura 113. Gráficas Fuerza-Desplazamiento y Esfuerzo-Deformación (Exp 1 Bobina sin secar (izda) y seca (dcha) PLA SmartMaterials) (Fuente Propia)	104
Figura 114. Gráficas Fuerza-Desplazamiento y Esfuerzo-Deformación (Exp. 2 y 4 PLA SmartMaterials) (Fuente Propia) .....	104
Figura 115. Gráficas Fuerza-Desplazamiento y Esfuerzo-Deformación (Exp. 5 y 6 PLA SmartMaterials) (Fuente Propia) .....	105
Figura 116. Gráficas Fuerza-Desplazamiento y Esfuerzo-Deformación (PLA Comercial (izad.) y Exp. 2 PP (dcha.)) (Fuente Propia).....	105



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de matriz en función del producto extruido.....	15
Tabla 2. Variación de la viscosidad con la temperatura en plásticos amorfos y semicristalinos. Fuente (rauwendal).....	23
Tabla 3. Temperaturas de fusión y de transición vítrea de diferentes plásticos. Fuente (rauwend).....	24
Tabla 4. Valores de densidad de diferentes plásticos. Fuente (rauwendal)....	25
Tabla 5. Temperatura y tiempo de secado del PLA, PP y PETG utilizados. ....	45
Tabla 6. Propiedades del PLA 3devo .....	48
Tabla 7. Parámetros de operación para el PLA 3devo (1,75 mm) .....	48
Tabla 8. Parámetros de operación para el PLA (2,85 mm).....	49
Tabla 9. Propiedades del PETG .....	50
Tabla 10. Tabla 11. Parámetros de operación para el PETG (1,75 mm).....	50
Tabla 12. Propiedades del PLA Smartmaterials3D .....	56
Tabla 13. Parámetros elegidos para los experimentos con PLA Smartmaterials3D.....	56
Tabla 14. Propiedades del PP .....	57
Tabla 15. Parámetros elegidos para los experimentos con PP .....	58
Tabla 16. Parámetros de impresión de las probetas de PLA y PP .....	64
Tabla 17. Experimentos realizados con PLA (3devo) .....	68
Tabla 18. Módulo de flexión, esfuerzo de flexión máximo y deformación en flexión máxima (Exp 1 y 2 PLA 3devo).....	72
Tabla 19. Experimentos PLA (SmartMaterials 3D) .....	73
Tabla 20. Módulo de flexión, esfuerzo de flexión máximo y deformación en flexión máxima (Exp 1 y 2 PLA SmartMaterials 3D) .....	75
Tabla 21. Módulo de flexión, esfuerzo de flexión máximo y deformación en flexión máxima (Exp 4,5 y 6 PLA SmartMaterials 3D).....	79
Tabla 22. Módulo de flexión, esfuerzo de flexión máximo y deformación en flexión máxima (PLA comercial VS Bobinas de PLA propias (Smartmaterials 3D)) .....	81
Tabla 23. Experimentos PLA (SmartMaterials 3D) .....	82
Tabla 24. Módulo de flexión, esfuerzo de flexión máximo y deformación en flexión máxima (PP) .....	85
Tabla 25. Módulo de flexión del PP obtenido y de 2 polipropilenos comerciales .....	85
Tabla 26. Mejores parámetros utilizados para fabricar filamento de PP .....	86
Tabla 27. Tabla comparativa entre Filamentadora 3Devo y filamentadoras nivel Principiante.....	96
Tabla 28. Tabla comparativa entre filamentadora 3devo y filamentadoras nivel avanzado .....	98



**Universidad de Valladolid**

Análisis de la obtención de filamento para  
impresión 3D utilizando una máquina  
extrusora de bajo coste



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**



Universidad de Valladolid

Análisis de la obtención de filamento para  
impresión 3D utilizando una máquina  
extrusora de bajo coste



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

# CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

## 1.1. Introducción

El presente Trabajo Fin de Grado surge de la necesidad de implantar un proyecto de Economía Circular a nivel local, basado tanto en el reciclado de plásticos procedentes de la Impresión 3D como pueden ser piezas defectuosas que no hayan sido utilizadas o piezas funcionales que han llegado al final de su vida útil y a las que se le puede dar otro uso como por ejemplo el caso de los productos ortoprotésicos (órtesis de mano, de pierna, de columna vertebral, craneales, etc...) como en el reciclado de productos cotidianos que normalmente son de un solo uso como por ejemplo las botellas de plástico.

Según el informe “La economía circular de los plásticos: Una visión Europea” publicada por Plastics Europe: la economía circular de los plásticos es un modelo de sistema cerrado que promueve la reutilización de productos plásticos, generando valor a los residuos y evitando el envío de productos plásticos recuperables a vertederos o al mar. En la actualidad el sector de los plásticos está centrado en la búsqueda de alternativas que permitan aumentar el porcentaje de los residuos convertidos en reciclados maximizando la eficiencia de los residuos y reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero. [1]

El informe anterior afirma que entre 2018 y 2020 aumentó en un 8% la cantidad de residuos plásticos enviada a instalaciones de reciclaje alcanzando una tasa del 35%, siendo todavía muy grande el 65% restante que se envía a vertederos e incineradoras. [1]

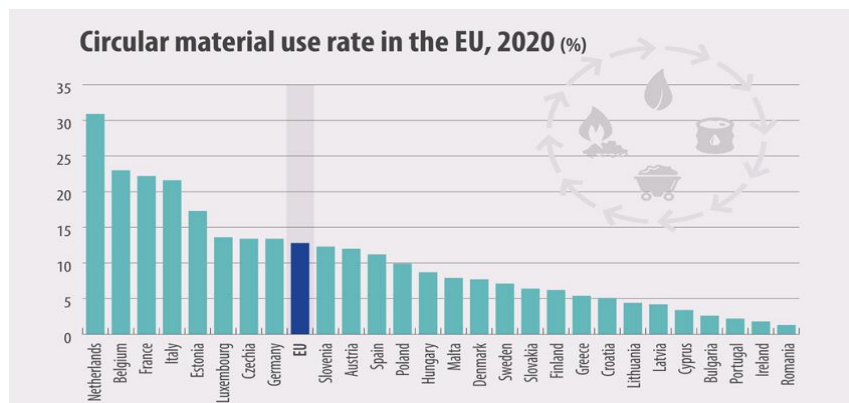


Figura 1. Tasa de uso de materiales circulares en la Unión Europea (2020) Fuente [2]

Según se observa en el gráfico, España está por debajo de la media europea en cuanto al uso de materiales circulares, situándose en un 11,2%, aunque en los últimos años ha ido mejorando progresivamente recuperando de esta forma la tendencia negativa que se registró entre 2010 y 2015 que cayó hasta el 7,5%. [2]



Por tanto, poner en marcha un proyecto circular aquí en España y en concreto en una ciudad como Valladolid presenta un gran avance en ese sentido.

Tal y como se ha dicho anteriormente este proyecto forma parte de un proyecto mayor de economía circular.

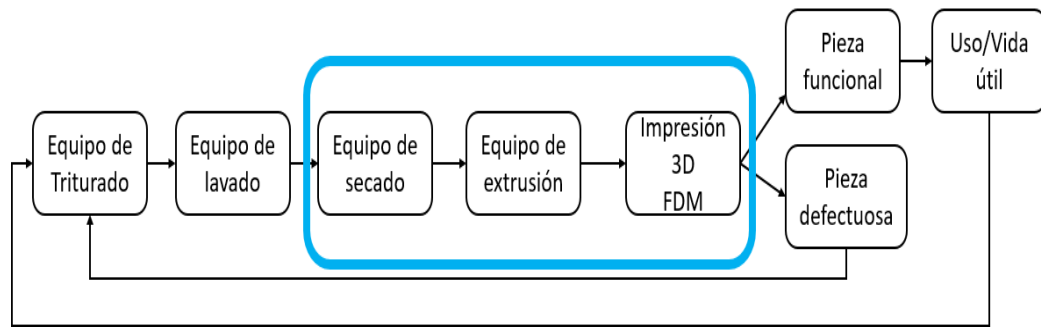


Figura 2. Esquema de Economía circular para el proceso de Impresión 3D. (Fuente Propia)

El trabajo actual se va a centrar en las 3 etapas que vienen rodeadas en azul en la Figura 2.

Esto quiere decir que se va a utilizar un equipo de extrusión de materiales poliméricos mediante el cual se va a obtener filamento plástico para su posterior uso en Impresión 3D. Para ello se va a partir de materiales plásticos en forma de pellet o gránulos, que se van a someter a un secado previo para posteriormente ser introducidos en el equipo de extrusión, del cual se va a obtener la correspondiente bobina de filamento plástico. Esta bobina se llevará a un equipo de impresión 3D para poder fabricar un prototipo o producto funcional.

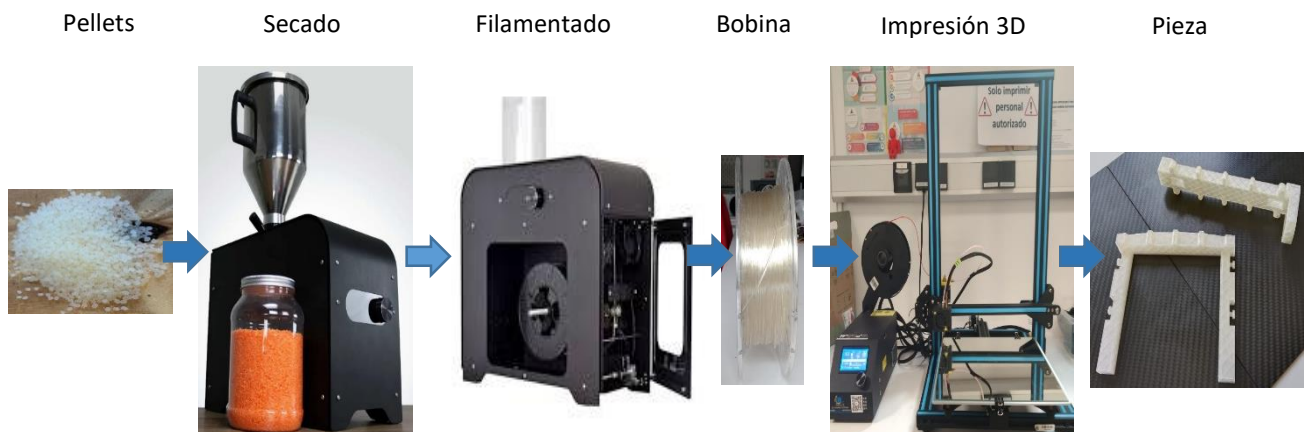


Figura 3. Diagrama del proceso de obtención de pieza impresa en 3D a partir de pellet (Fuente Propia)



## 1.2. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es la fabricación de bobinas de filamento plástico para impresión 3D utilizando un equipo de extrusión de bajo coste.

Como puntos clave de este proyecto se plantean los siguientes:

- Aprendizaje del correcto manejo del equipo necesario para llevar a cabo tanto el proceso de extrusión de plásticos como el proceso de impresión 3D del filamento obtenido.
- Análisis de los parámetros de operación más importantes del proceso de extrusión (temperaturas, velocidad del husillo y refrigeración) para ver cómo afectan a la calidad del filamento plástico obtenido y al proceso de Impresión 3D posterior.
- Realización de los ensayos a flexión de las probetas obtenidas por impresión 3D para el análisis de los diferentes filamentos obtenidos y caracterización de los materiales utilizados.

## 1.3. Estructura

En este apartado se describe la estructura que se va a seguir a lo largo del trabajo.

- *Capítulo I: Introducción*

En este capítulo se explica de forma breve el contexto del proyecto, de dónde surge y se muestra un esquema del proceso que se va a llevar a cabo durante el mismo.

- *Capítulo II: Estado de la técnica*

En este capítulo se describe con detalle en qué consiste el proceso de extrusión de plástico, así como los parámetros más importantes del mismo y las propiedades de los plásticos en extrusión, finalizando con un estudio de mercado en el que se analizan brevemente las extrusoras de plástico de bajo coste que hay disponibles.



- *Capítulo III: Fabricación de filamento para impresión 3D*

En este capítulo se hace una breve introducción a la tecnología FDM utilizada en impresión 3D. También se habla de las propiedades de los materiales utilizados para la fabricación del filamento, así como de los equipos utilizados durante todo el proceso, acabando con un resumen de todos los experimentos que se han llevado a cabo.

- *Capítulo IV: Análisis del filamento obtenido*

En este capítulo primero se habla de los equipos utilizados para realizar el análisis de los filamentos obtenidos (impresoras 3D y máquina de ensayos) y después se analizan los resultados obtenidos para cada tipo de material.

- *Capítulo V: Conclusiones y líneas futuras*

En este capítulo se exponen las conclusiones finales a las que se ha llegado, así como las posibles líneas futuras que se podrían seguir.

- *Capítulo VI: Fabricación de filamento para impresión 3D*

En este apartado se incluye toda la bibliografía que se ha consultado para realizar la memoria del trabajo.

- *Capítulo VII: Anexos*

En este apartado se adjuntan diferentes tablas y gráficas de los experimentos realizados.



**Universidad de Valladolid**

Análisis de la obtención de filamento para  
impresión 3D utilizando una máquina  
extrusora de bajo coste



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**



Universidad de Valladolid

Análisis de la obtención de filamento para  
impresión 3D utilizando una máquina  
extrusora de bajo coste



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

## CAPÍTULO II: ESTADO DE LA TÉCNICA

## 2.1. Proceso de extrusión

El proceso de extrusión es un proceso continuo que consiste en forzar el paso de un material (arcillas cerámicas, metales, plásticos) a través de una abertura o boquilla que tiene la forma del producto que se quiere obtener. Para llevar a cabo este proceso las máquinas más utilizadas en la industria reciben el nombre de extrusoras. Éstas tienen como objetivo principal ser capaces de desarrollar suficiente presión en el material para poder forzarlo a salir a través de la boquilla. [3]

El desarrollo de este trabajo se va a centrar en la extrusión de materiales termoplásticos para fabricar filamento para impresión 3D. A continuación, se puede observar un esquema simplificado de dicho procedimiento:

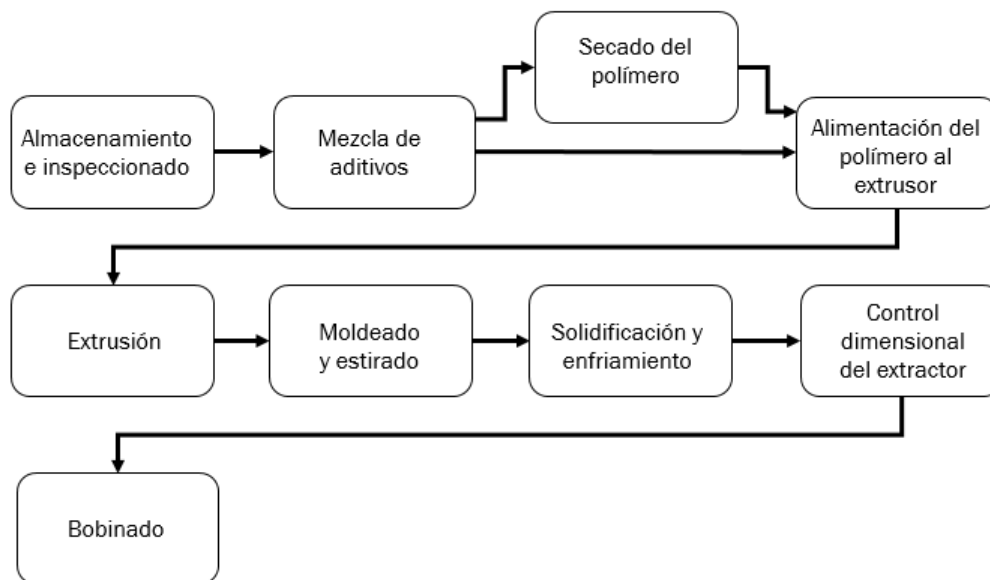


Figura 4. Esquema simplificado del proceso de extrusión de plásticos para la obtención de filamento para impresión 3D. Fuente [4]



Tal y como se observa en la Figura 4. Esquema simplificado del proceso de extrusión de plásticos para la obtención de filamento para impresión 3D. Fuente el proceso de extrusión comienza con la inspección y el almacenaje del material polimérico. Antes de la extrusión, el polímero se puede mezclar con diferentes aditivos (estabilizadores UV, retardantes de llama, refuerzos, cargas, etc.) para que el producto tenga las propiedades deseadas. Algunos plásticos se han de someter previamente a un proceso de secado para eliminar la humedad que puedan contener o que puedan haber absorbido durante la etapa de almacenaje evitando así los problemas en la etapa de extrusión debidos a la humedad. Una vez que el plástico se ha secado, se introduce en la extrusora a través de la tolva colocada en la parte superior y que se encuentra conectada con el tornillo extrusor. Éste gira dentro del cilindro o barril y empuja el plástico a través de la sección del mismo. A su paso por el barril el polímero se funde y se mezcla debido por un lado al calor por conducción generado por los calentadores externos colocados a lo largo de la superficie del cilindro, y por otro al calor por fricción generado por la rotación del tornillo. A continuación, el material fundido es empujado y forzado a salir a través de la matriz con la forma deseada para posteriormente enfriarlo y retirarlo de la extrusora a una velocidad constante consiguiendo así la sección transversal adecuada. [4] Finalmente, en este caso concreto, el filamento se lleva al sistema de bobinado en el cual se va a ir enrollando alrededor de la bobina para su posterior uso en una impresora 3D.

## 2.2. Tipos de extrusores [5]

Existen 3 tipos de extrusoras en la industria del plástico:

**2.2.1.** Extrusora de un solo tornillo o monohusillo: es la más común y contiene solamente un tornillo de extrusión.

**2.2.2.** Extrusora de dos tornillos o de doble husillo: contiene dos tornillos de extrusión.

En función de la dirección de giro de los husillos estos tipos de extrusora se pueden dividir en:

- Extrusoras de doble tornillo corrotante: ambos tornillos giran en la misma dirección.
- Extrusoras de doble tornillo contrarrotante: los tornillos giran en direcciones opuestas. Esto hace que tengan mejores características de transporte que las corrotantes.

**2.2.3.** Extrusora de pistón: en este tipo de extrusoras la presión ejercida sobre el material se realiza a través de un pistón.

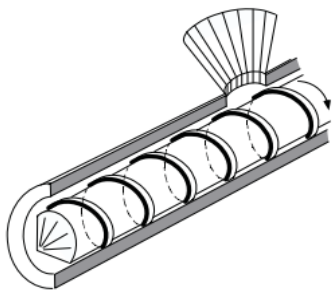


Figura 5. Extrusora monohusillo. Fuente [5]

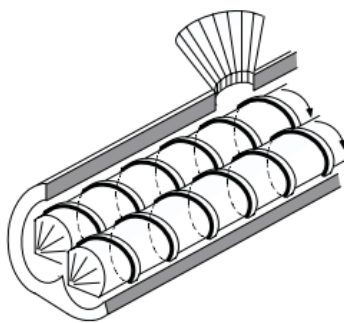


Figura 6. Extrusora de doble husillo corrotante. Fuente [5]

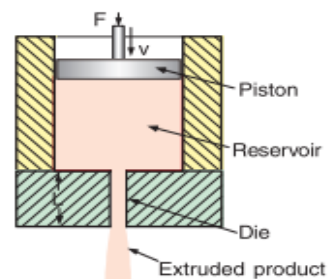


Figura 7. Extrusora de Pistón. Fuente [5]



### 2.3. Componentes de un extrusor. [5]

A continuación, se va a hablar de los componentes generales de los que consta una máquina extrusora convencional.

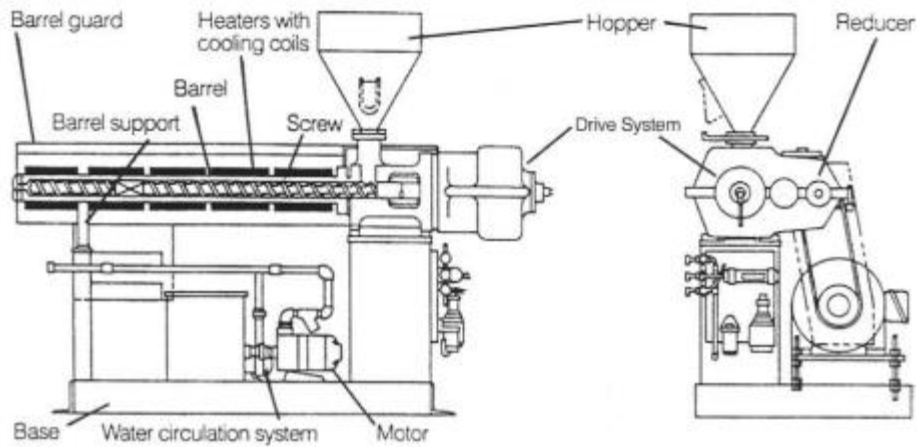


Figura 8. Esquema simplificado de los componentes principales de una extrusora monohusillo industrial. Fuente [3]

#### 2.3.1. Garganta y tolva de alimentación

La garganta de alimentación es la abertura a través de la cual el material plástico se introduce en la extrusora. En algunos casos la garganta tiene refrigeración por agua ya que así se evita que las partículas de plástico se empiecen a fundir y se peguen a la pared. Algunas extrusoras no poseen una garganta de alimentación separada, sino que la abertura se mecaniza directamente en el barril, lo que lleva a un menor coste, menor número de piezas y a una ausencia de problemas relacionados con la alineación entre el barril y la garganta mientras que el problema de este tipo de configuración es que hay una mayor dificultad a la hora de crear una barrera térmica entre el abrill caliente y la zona fría de la garganta.

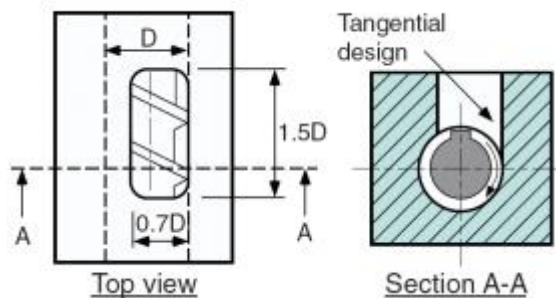


Figura 9. Geometría preferida para la apertura de la garganta de alimentación. Fuente [5]

La tolva de alimentación contiene los pellets o gránulos de plástico y descarga dicho material en la garganta de alimentación. Para que el proceso de extrusión se lleve a cabo de forma correcta, se debe conseguir un flujo constante de material. Para ello el diseño de la tolva es crucial, por lo que la mejor solución es una tolva circular que tenga una transición gradual en la sección cónica.

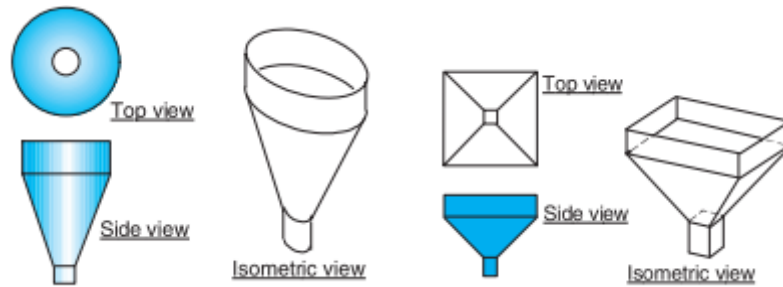


Figura 10. Buen diseño de tolva (izda) y mal diseño de tolva (dcha). Fuente [5]

Puede darse el caso de que el material plástico (polvo, triturado) se atasque en el interior de la tolva provocando que disminuya el flujo de alimentación. Para evitar esto, se pueden utilizar dispositivos que faciliten un flujo constante a través de la tolva tales como: agitadores, rascadores o almohadillas vibratorias.

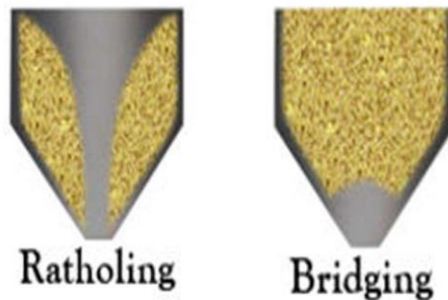


Figura 12. Estructuras de cohesión más comunes. Fuente [6]



Figura 11. Alimentador vibratorio. Fuente [6]

### 2.3.2. Husillo o tornillo sinfín

El tornillo sinfín es el principal componente de una extrusora ya que cumple funciones clave en el funcionamiento del proceso tales como: carga, transporte, calentamiento, fusión y mezcla del plástico. El tornillo se trata de un cilindro largo con un vuelo helicoidal que lo envuelve. [5]

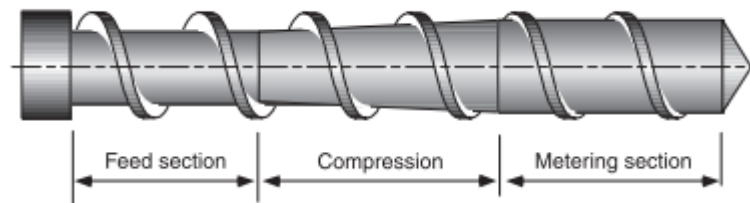


Figura 13. Tornillo sinfín de un solo tramo. Fuente [5]

Tal y como se observa en la figura 9, se pueden observar 3 zonas diferenciadas en el tornillo sinfín:

- Zona de alimentación: en esta zona se produce la carga del material plástico en forma de triturado o gránulos, aún en estado sólido.
- Zona de compresión: en esta zona el material se funde y se compacta en gran parte debido al aumento de sección del tornillo que hace que las partículas rocen entre el husillo y la pared del cilindro (calor por fricción).
- Zona de descarga: en esta zona el material ya está fundido completamente y es en la cual ya se le da la homogeneización deseada para obtener el producto final.

Tal y como se ha comentado, el husillo es el corazón de una extrusora por lo que la calidad del producto final vendrá determinada en gran parte por un buen diseño del tornillo. [5]

### 2.3.3. Barril o cilindro

El cilindro o barril de la extrusora es un cilindro recto que normalmente va equipado con una camisa bimetálica que tiene una alta resistencia al desgaste mayor que la del tornillo. Algunas veces el cilindro tiene una apertura cuya función es la de ventilar el equipo eliminando así los posibles volátiles que se puedan producir al fundir el plástico. En estos casos la extrusora utiliza un tornillo especial denominado “tornillo de dos etapas” para así evitar que el plástico fundido se salga por la abertura de ventilación.

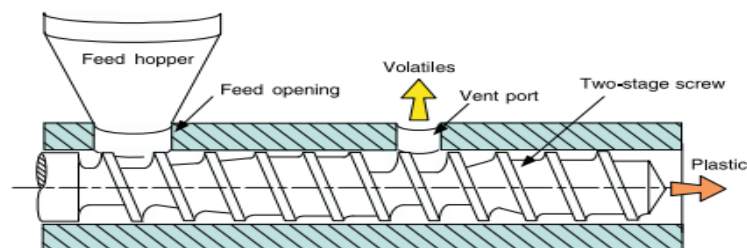


Figura 14. Barril con apertura de ventilación y tornillo de dos etapas. Fuente [5]

- Sistema de calentamiento y enfriamiento del barril

El barril posee la capacidad de calentamiento y enfriamiento. El calentamiento se suele realizar mediante calentadores eléctricos que se sitúan a lo largo del mismo, pudiéndose alcanzar temperaturas de hasta 550 °C.

Otros métodos menos comunes de calentamiento son el calentamiento por radiación, inducción o por fluidos.

En la mayor parte de las extrusoras hay al menos 3 zonas de calentamiento a lo largo del barril, pudiendo llegar a tener aquellas extrusoras largas más de 8 zonas de calentamiento, cada una de ellas con al menos un sensor para poder medir la temperatura.

El enfriamiento del cilindro es necesario en aquellos casos en los que se trabaje con plásticos muy viscosos y a velocidades del tornillo elevadas ya que se genera un calor interno que hace que la temperatura del barril suba por encima del punto de consigna. Normalmente en la mayoría de extrusoras el enfriamiento se realiza con aire a través una serie de ventiladores colocados en cada una de las zonas de calentamiento. En aquellos casos en los que haya que eliminar una gran cantidad de calor, el enfriamiento se puede realizar con agua o con aceite, con el inconveniente de que esto dificulta poder tener un mejor control de la temperatura.

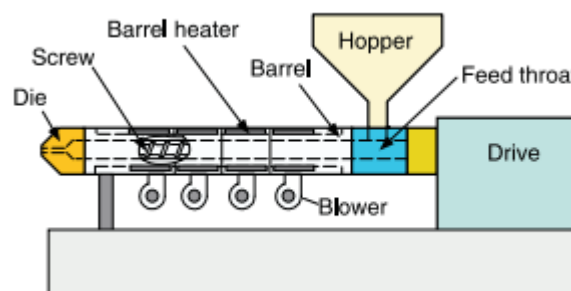


Figura 15. Extrusora con calentadores y refrigeradores por aire. Fuente [5]

#### 2.3.4. Boquilla o matriz de salida

La boquilla se coloca en la parte final de la extrusora y es la zona donde se produce la descarga del material. Esta boquilla tiene como función moldear el plástico que fluye a través del sistema tornillo-cilindro para darle la forma deseada según el producto que se quiera obtener.



Tabla 1. Tipos de matriz en función del producto extruido

Tipo de matriz	Producto extruido
Anular	Tubos, tuberías y revestimientos de alambre
De corte	Láminas planas
Circular	Fibras y varillas
De perfil	Formas diferentes a las anteriores

### 2.3.5. Motor [5]

El motor es el encargado de suministrar la energía necesaria para que el tornillo gire a la velocidad necesaria para que se lleve a cabo el proceso de extrusión de manera óptima. Debido a que la velocidad del motor es mucho más grande que la del tornillo es necesaria la implantación de una reductora entre el propio tornillo y el motor. Las relaciones de reducción típicas oscilan entre 15:1 y 20:1.

### 2.4. Variables más importantes del proceso de extrusión [5]

Los parámetros más importantes durante el proceso de extrusión son: la presión de fusión (P) y la temperatura de fusión (T). Estos parámetros son medidas de la eficiencia del proceso de extrusión por lo que, en la mayor parte de los casos los problemas en el proceso se hacen evidentes por primera vez a partir de las lecturas de presión y/o temperatura de fusión.

A parte de estos dos parámetros, hay otros que también son importantes en la extrusión:

- Velocidad del husillo
- Carga del motor
- Temperaturas del cilindro
- Temperatura de la matriz
- Consumo de energía de los calentadores

### 2.4.1. Presión de fusión

Es la variable más importante del proceso ya que su medida nos ayuda a realizar un mejor seguimiento y control del proceso, así como de seguridad del mismo.

La presión de la boquilla es aquella que se necesita para poder superar la resistencia de la matriz y es una medida directa del caudal que pasa por la matriz, y por lo tanto será dicha presión la que va a determinar la dimensión del producto extruido. En la Figura siguiente se ve la relación entre ambas.

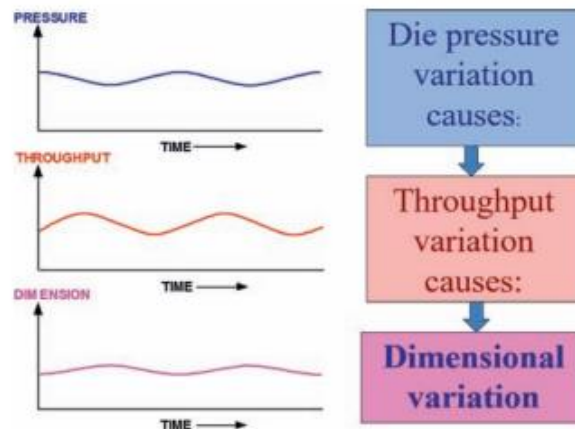


Figura 16. Efecto de la variación de la presión de entrada de la matriz en la variación dimensional del material extruido.  
Fuente [5]

En lo que al control y seguimiento del proceso se refiere, una correcta medida de la variación de la presión con el tiempo nos permitirá observar la estabilidad del proceso de extrusión. Para medir esta presión se utilizan transductores de presión que contienen una membrana fina en contacto con el plástico fundido. La mejor forma de controlar la presión es mediante un sistema de adquisición de datos por ordenador.



Figura 17. Transductor de presión

En cuanto a la seguridad del proceso, es importante también medir la presión en la extrusora para evitar que se produzcan accidentes graves debidos a las altas presiones, tales como explosiones. Para evitar esto, las extrusoras debería de contar con un sistema de seguridad contra la sobrepresión (disco de ruptura).

### 2.4.2. Temperatura de fusión

En todo proceso de extrusión, un correcto control de la temperatura es crucial para lograr una buena estabilidad en el proceso.

La temperatura de fusión se suele medir con un termopar de inmersión. El vástago de la sonda está sumergido en la masa fundida y lee la temperatura en el punto de unión del termopar. El problema que presentan este tipo de sondas es que modifican las velocidades en el canal y como resultado la temperatura que se está midiendo es distinta a la temperatura de fusión en ese punto si no estuviese la sonda. Hay diferentes sondas de temperatura tal y como se ve en la Figura 15.

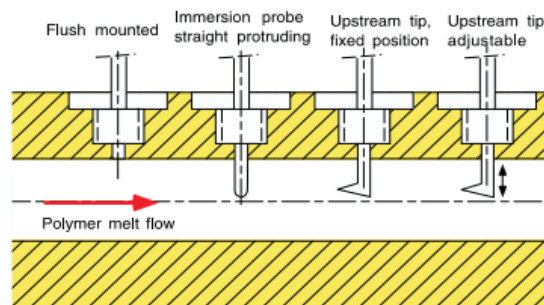


Figura 18. Diferentes tipos de sondas de temperatura. Fuente [5]

A parte de usar termopares, la temperatura de fusión se puede medir con termómetros infrarrojos. Para ello la temperatura se puede medir a través de una ventana transparente montada en el cilindro, tal y como se observa en la siguiente.

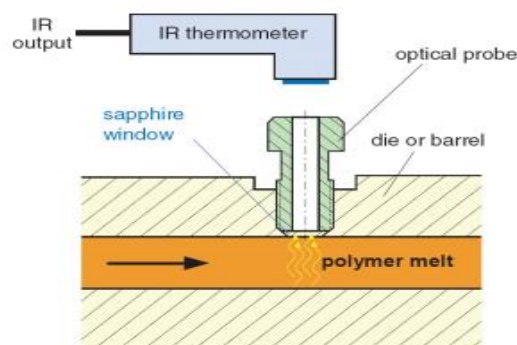


Figura 19. Medida de la temperatura de fusión mediante infrarrojos a través de un cristal de zafiro. Fuente [5]

## 2.5. Propiedades de los materiales plásticos en extrusión

En este apartado se van a analizar las diferentes clases de plásticos, así como las propiedades de flujo y térmicas, que influyen de manera importante en el proceso de extrusión.

- **Tipos de plásticos**

Los plásticos también denominados polímeros, son macromoléculas formadas por la repetición de unidades químicas simples llamadas monómeros que se obtienen mediante un proceso conocido como polimerización. Los átomos de la columna vertebral del polímero suelen ser carbono (C), oxígeno (O), nitrógeno (N) o azufre (S) que se combinan en una configuración que es única para cada polímero. De estos átomos el carbono es el principal de la columna vertebral y hay otros átomos como el hidrógeno (H), cloro (Cl), bromo (Br) o flúor (F) que se unen a la larga espina dorsal del polímero que diferencian un polímero de otro. Cada material polimérico posee una distribución espacial única que le confiere unas propiedades físicas y reológicas (de flujo) específicas. [4]

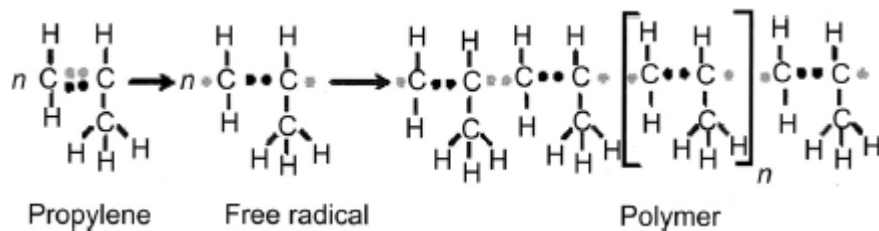


Figura 20. Estructura química del polipropileno (Monómero de propileno (izda.) y cadena de polipropileno (dcha.)). Fuente [4]

En función de su estructura química y de su comportamiento frente a la temperatura los plásticos se pueden clasificar en termoplásticos y termoestables.

- *Termoplásticos*

Los termoplásticos son aquellos que al ser calentados por encima de una determinada temperatura (de reblandecimiento o de fusión) se ablandan, funden y fluyen como fluidos permitiendo así su uso en procesos como la inyección o la extrusión. Los termoplásticos una vez se vuelven a enfriar se endurecen y se comportan de nuevo como un sólido. Esta peculiaridad hace que estos materiales se puedan procesar repetidas veces por lo que son muy adecuados para el reciclaje. Ejemplos de termoplásticos son el polietileno, polipropileno, ABS, etc...



- *Termoestables*

Los termoestables por su parte, son plásticos que al ser calentados por encima de una determinada temperatura se endurecen formando una fuerte red tridimensional en la cual las moléculas están unidas por fuertes enlaces, por lo que no pueden volver a ablandarse como los termoplásticos dificultando así su reciclaje. Ejemplos de termoestables son las ureas y las resinas epoxi.

En función de su estructura los polímeros termoplásticos se pueden clasificar en amorfos y semicristalinos.

- Polímeros amorfos:

Son aquellos que poseen una estructura formada por cadenas poliméricas aleatorias sin regiones cristalinas como por ejemplo el PVC (policloruro de vinilo), poliestireno (PS) o el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno).



Figura 21. Estructura de un polímero amorfo. Fuente [4]

- Polímeros semicristalinos:

Son aquellos en cuya estructura podemos encontrar cadenas poliméricas aleatorias (zonas amorfas) y cadenas poliméricas ordenadas (zonas cristalinas). Son polímeros cristalinos el polietileno de alta densidad (HDPE), el tereftalato de polietileno (PET) y el polipropileno (PP) entre otros.

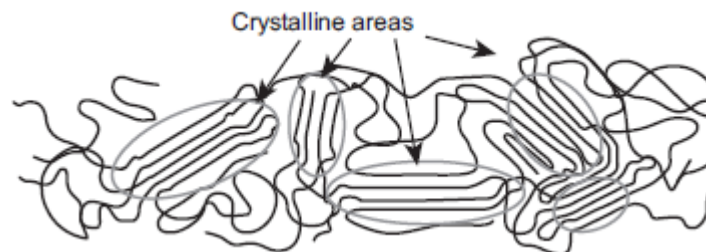


Figura 22. Estructura de un polímero semicristalino. Fuente [4]



En general la morfología que se desarrolla en un plástico depende de la velocidad de enfriamiento y de las tensiones efectuadas sobre el material durante todo el proceso, por lo que tanto el flujo como las temperaturas en la matriz y después de la matriz tienen un papel fundamental en las propiedades y morfología del producto extruido. Fuente [5]

- Reología de los polímeros

La reología es la rama de la física que se encarga del estudio del flujo y la deformación de los materiales al ser sometidos a tensiones o fuerzas. Mientras que el agua, el aceite, los disolventes orgánicos y la mayoría de líquidos cotidianos son fluidos newtonianos, es decir, se deforman al aplicarles una fuerza y continúan deformándose hasta que cesa dicha fuerza siendo la velocidad de deformación directamente proporcional a esa fuerza aplicada, los polímeros en estado fundido no presentan esa relación directa entre velocidad de deformación y fuerza aplicada sobre la masa fundida por lo cual se conocen como fluidos no newtonianos. Cuando se aplica una fuerza sobre un polímero fundido, se produce una deformación y mientras el componente viscoso del material fundido permanece deformado cuando cesa la fuerza, el componente elástico recupera su forma original. [4]

Por tanto, cuando aplicamos una fuerza sobre un plástico fundido pueden ocurrir 3 cosas:

- Flujo viscoso: el material se deforma cuando se aplica una fuerza y sigue deformado al dejar de aplicar la fuerza
- Deformación elástica: el material se deforma al aplicarle una fuerza, pero recupera su forma cuando se deja de someter a dicha fuerza
- Ruptura: el material se deforma por encima del límite elástico hasta que rompe por lo que no puede volver a su estado original. [4]

Si queremos entender cómo se comporta un plástico durante su procesamiento, hay que conocer cómo fluye ese material en estado fundido. Una de las propiedades de flujo más importantes es la viscosidad del fluido.

- *Viscosidad*

La viscosidad se define como la medida de la resistencia de un fluido a la deformación gradual por cizallamiento o tensión. Es decir, la viscosidad describe la resistencia de un fluido a fluir. Por ejemplo, el agua es un fluido de baja viscosidad ya que fluye fácilmente mientras que la miel es un fluido que presenta una alta viscosidad ya que fluye con menos facilidad. [5] La viscosidad se expresa en Pas y se define como el cociente entre el esfuerzo de cizallamiento que actúa sobre el fluido y la tasa de cizallamiento:

$$\eta = \frac{\text{Esfuerzo de cizallamiento}}{\text{Tasa de cizallamiento}} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [\text{Ecuación 1}]$$

El esfuerzo de cizallamiento ( $\tau$ ) es la fuerza por unidad de superficie que se necesita para mantener una velocidad de movimiento constante. [4]

La tasa de cizallamiento ( $\dot{\gamma}$ ) es una medida de la deformación del polímero fundido, que se calcula a partir de la velocidad de flujo y de la geometría del canal por el cual está pasando el fluido. Las unidades normales de la velocidad de cizallamiento son los segundos recíprocos. [4]

En la siguiente figura se puede observar un gráfico que relaciona la velocidad de cizallamiento frente a la viscosidad y las zonas generales de velocidad de cizallamiento en las que se producen diferentes procesos como la extrusión.

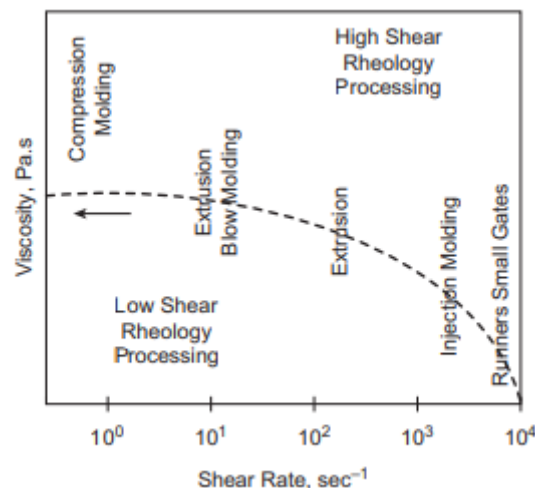


Figura 23. Velocidad de cizallamiento frente a viscosidad. Fuente [4]

- **MFI (Índice de fluidez)** [6]

La viscosidad de los polímeros normalmente se mide por el índice de fluidez (MFI). Éste índice indica la cantidad de plástico extruido en gramos (g) en un determinado tiempo (10 minutos normalmente). Para medir este valor se utiliza un reómetro capilar.

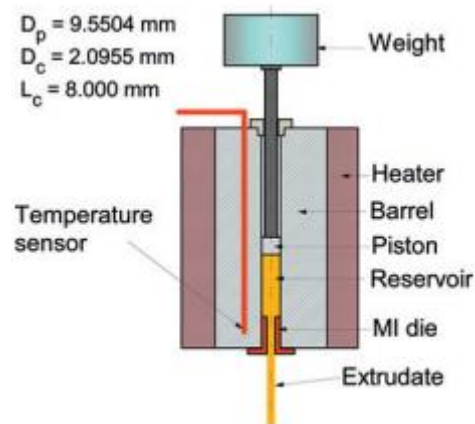


Figura 24. Esquema de un reómetro capilar. Fuente [5]

Para llevar a cabo el proceso, se retira el pistón y se añade el polímero al interior del cilindro calefactado. Allí se deja que llegue hasta su temperatura de equilibrio y pasados unos minutos se aplica peso al pistón para que fuerce al plástico fundido a salir a través del orificio situado al fondo del barril. Pasados 10 minutos se recoge la cantidad de material que ha salido por el orificio y se pesa en una báscula de precisión y el valor obtenido será el valor del MFI cuyas unidades son g/10 min.

El valor del MFI es inversamente proporcional a la viscosidad, por lo que un valor alto de éste índice nos indicará que la viscosidad del material es baja y por el contrario para materiales con viscosidades elevadas el índice de fluidez será bajo. Según el índice de fluidez encontramos diferentes grados de polímeros que son más adecuados para un determinado proceso.

- MFI < 10: materiales adecuados para procesos de extrusión dada su mayor viscosidad.
- MFI ~ 10: materiales que funcionan bien en extrusión y en impresión 3D.
- MFI > 10: materiales adecuados para procesos de inyección por moldeo ya que debido a que tienen una alta fluidez es más difícil controlar el flujo y darles forma de filamento.

Un parámetro importante que influye en la viscosidad de un material polimérico es la temperatura. Dependiendo del tipo de material afectará en mayor o menor medida, por ejemplo, los plásticos amorfos presentan una gran sensibilidad a la temperatura respecto a los plásticos semicristalinos. De la Tabla 2 se deduce que un cambio en la temperatura del barril va a suponer un efecto mucho mayor en un plástico amorfo que en uno semicristalino, por lo que el control de la temperatura es mucho más crítico a la hora de procesar los primeros. [5]

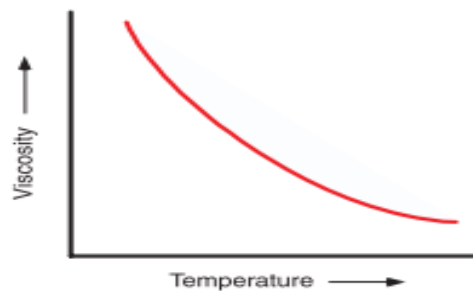


Figura 25. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad. Fuente [5]

Tabla 2. Variación de la viscosidad con la temperatura en plásticos amorfos y semicristalinos. Fuente [5]

Tipo de plástico	Variación de la viscosidad por cada grado de cambio en la temperatura
Amorfo	5-20 %
Semicristalino	2-3 %

- Generación de calor viscoso

Otro parámetro importante en la extrusión de los plásticos y que tiene que ver con la viscosidad es el denominado calor de generación viscoso. Este calor es generado debido a la fuerza de cizallamiento aplicada sobre un termoplástico, y se define como el producto de la viscosidad por la velocidad de cizallamiento al cuadrado, por lo que, a mayor viscosidad y mayor velocidad, mayor será la generación de calor viscoso teniendo mayor efecto el aumento de velocidad ya que este valor se encuentra elevado al cuadrado. Debido a la alta viscosidad de los plásticos, en el proceso de extrusión, la mayor parte del calentamiento del plástico proviene de la generación de calor viscoso. [5]

Una vez vistos los parámetros anteriores, se van a definir una serie de propiedades térmicas de los materiales que son importantes a la hora de seleccionar tanto el material como el equipo y los parámetros del proceso que se van a utilizar. [5]

- *Punto de fusión*

Temperatura a la cual un plástico se funde. Esto es solamente aplicable a los plásticos semicristalinos ya que los amorfos no poseen cristalitas en su estructura. Normalmente los polímeros se procesan unos 50 °C por encima de su temperatura de fusión, aunque esto dependerá también de la viscosidad del material ya que si la viscosidad es alta la temperatura será aquella que tenga el valor más alto posible, pero sin llegar a degradar el plástico lo que provocaría problemas durante el procesado.

- *Temperatura de transición vítrea*

Los plásticos son rígidos a temperaturas bajas y se vuelven dúctiles y maleables a temperaturas altas. La transición entre ambas fases es lo que se denomina temperatura de transición vítrea.

En la Tabla 3 se pueden ver los valores de temperatura de transición vítrea y punto de fusión de algunos plásticos.

*Tabla 3. Temperaturas de fusión y de transición vítrea de diferentes plásticos. Fuente [5]*

Plástico	Temperatura de transición vítrea (°C)	Temperatura de fusión (°C)
Poliestireno	101	217
Cloruro de polivinilo (PVC)	80	177
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	115	
Policarbonato (PC)	150	
Polietileno de baja densidad (LDPE)	-120/-90	120
Polietileno de alta densidad (HDPE)	-120/-90	130
Polipropileno (PP)	-10	175
Tereftalato de polietileno (PET)	70	275

- *Conductividad térmica*

La conductividad térmica es la capacidad que tiene un material para conducir el calor. Los plásticos tienen valores bajos de conductividad (se consideran aislantes de calor) por lo que en procesos como la extrusión se pueden producir temperaturas de plástico no uniformes ya que al introducir el material dentro del cilindro se necesita un tiempo considerable para que las temperaturas de la masa fundida se igualen por conducción.

- *Calor específico y entalpía*

El calor específico se determina como la energía que se necesita para aumentar 1 grado la temperatura de 1 kg de un material y se expresa en las siguientes unidades: J/kg K. La cantidad de calor que se necesita para subir la temperatura de un material viene determinada por la diferencia de entalpía entre ambas temperaturas. Esta entalpía se expresa en kWh/kg, por lo que es una energía específica, es decir, energía por unidad de masa.

- *Densidad*

La densidad se define como la masa de un material dividida por su volumen y se expresa en g/cm<sup>3</sup>. La mayoría de los plásticos tienen una densidad bastante cercana a la densidad del agua (1 g/cm<sup>3</sup>). En la tabla que se muestra a continuación se pueden observar los valores de las densidades de algunos plásticos.

*Tabla 4. Valores de densidad de diferentes plásticos. Fuente [5]*

Plástico	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Polietileno de baja densidad (LDPE)	0,92
Polietileno de alta densidad (HDPE)	0,95
Policloruro de vinilo (PVC)	1,40
Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS)	1,02
Polipropileno (PP)	0,91
Tereftalato de polietileno (PET)	1,35



- *Estabilidad térmica y tiempo de inducción*

Durante el proceso de extrusión, el plástico se puede degradar debido a que se encuentra sometido a altas temperaturas durante un tiempo prolongado, lo que provoca que el material pierda sus propiedades mecánicas e incluso se llegue a quemar. El tiempo de inducción es el tiempo que un material plástico puede sobrevivir a temperaturas elevadas sin mostrar una degradación medible, por lo que es un valor que indica la estabilidad térmica del plástico. Por tanto, a mayor tiempo de inducción mayor estabilidad térmica tendrá el polímero.

## 2.6. Filamentadoras de bajo coste en el mercado

Tal y como se ha comentado en el CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN, este proyecto se va a centrar en el análisis del filamento plástico obtenido para impresión 3D mediante una máquina extrusora de bajo coste.

En los apartados anteriores se ha hablado del proceso de extrusión de plásticos a una escala más industrial. En este caso particular las extrusoras que se van a utilizar tal y como se ha dicho son a nivel “escritorio”, es decir, que cualquier usuario que quiera iniciarse en el mundo de la extrusión de plásticos pueda disponer de una máquina extrusora para fabricar su propio filamento.

Por tanto, este tipo de máquinas no van a ser tan complejas como las extrusoras industriales, aunque el funcionamiento va a ser el mismo: se introduce el plástico en forma de gránulos/pellet/triturado a través de la tolva hacia el tornillo sinfín, que empuja el plástico a lo largo del cilindro gracias al accionamiento del sistema motor-reductora, fundiéndolo hasta que sale a través la boquilla con la forma deseada para después ser enfriado y llevado al sistema de enrollado en el que finalmente se obtiene la bobina de filamento para su posterior uso en una impresora 3D.

En este apartado se va a realizar un estudio de las diferentes filamentadoras de plástico de bajo coste que hay en el mercado actual, distinguiendo entre aquellos sistemas en los que el usuario sea un principiante en el mundo de la extrusión y aquellos en los que el usuario tenga un nivel más avanzado.



- *Sistemas para nivel Principiante*

- **Filastruder [7]**

Filastruder es la filamentadora que distribuye la empresa Filastruder con sede en Georgia que surgió en 2013 gracias a una campaña de Kickstarter. La compañía tiene como objetivo principal proporcionar acceso a los productos que hacen que la impresión 3D sea menos frustrante y más agradable.

El sistema Filastruder está formado por los siguientes componentes:

- Filastruder kit: sistema de extrusión
- Filawinder: sistema de guiado y bobinado de filamento



Figura 26. Filastruder kit Fuente [7]

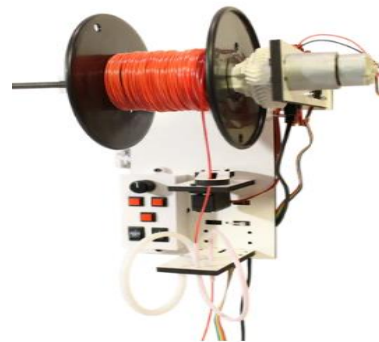


Figura 27. Filawinder Fuente [7]

- **Felfil EVO [8]**

Felfil EVO es la filamentadora que distribuye la empresa Felfil. Esta compañía nació a raíz de un proyecto universitario desarrollado en el politécnico de Turín. Sus objetivos son hacer de la extrusión un proceso más sostenible, minimizando residuos, pero sin dejar de lado la experimentación con materiales plásticos.

El equipo de extrusión de Felfil está formado por los siguientes componentes:

- Felfil EVO: sistema de extrusión.
- Felfil Spooler: sistema de enfriamiento por ventiladores y sistema de guiado y bobinado de filamento.

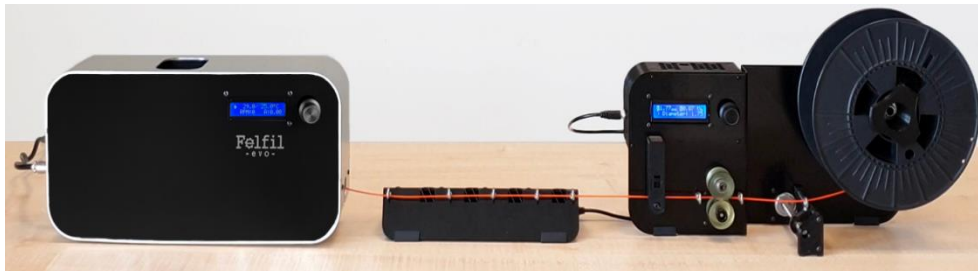


Figura 28. Felfil EVO (izda) y Felfil Spooler (centro y dcha.) Fuente [8]

- **Protocycler + [9]**

La filamentadora Protocycler + es distribuida por la empresa ReDeTec surgida en 2010 con sede en Toronto la cual se dedica a la fabricación de plásticos avanzados además de ser líder del sector en el espacio de la extrusión y reciclaje de filamentos para impresoras 3D.

La particularidad de esta máquina extrusora de plástico es que tiene incorporada una trituradora de plástico accionada con una manivela, por lo que directamente se pueden introducir restos de plásticos de mayor tamaño que los pellets/gránulos.

La Protocycler + incluye todos los componentes en unos solo, es decir, el sistema de extrusión y de bobinado vienen juntos tal y como se observa en la figura 21.



Figura 29. Filamentadora Protocycler + Fuente [9]

- *Sistemas para nivel Avanzado*

- **Filabot EX6 [10]**

Filabot EX6 es la filamentadora que distribuye la compañía Filabot. Esta empresa estadounidense con sede en Vermont líder en la investigación y desarrollo de la extrusión de plástico para el mercado 3D, comprometida a diseñar un futuro más sostenible mediante la miniaturización de vanguardia de los procesos industriales de los polímeros.

El equipo de Filabot EX6 está formado por los siguientes componentes:

- Filabot EX6 Filament extruder: sistema de extrusión
- Filabot Airpath: sistema de enfriamiento con ventiladores
- Filabot Spooler: sistema de bobinado de filamento que dispone de un sensor óptico para medición del diámetro, un sistema de arrastre y un soporte para bobinas.



Figura 30. Filabot EX6 Filament extruder (dcha.) Filabot Airpath (centro) Filabot Spooler (izda.) Fuente [10]

- **Filafab Extruder PRO 350 EX [11]**

Filafab Extruder PRO 350 EX Series es la extrusora de filamento que distribuye la empresa D3D Innovations Limited. Esta compañía tiene como objetivos principales eliminar las barreras de la impresión 3D reduciendo drásticamente los costes, al tiempo que se reduce el impacto medioambiental de dicha industria que se encuentra en constante crecimiento.

El sistema de extrusión de Filafab está formado por los siguientes componentes:

- Filafab Extruder PRO 350 EX Series: sistema de extrusión.
- Filafab cooler: sistema de enfriamiento formado por ventiladores en serie.
- Filafab Haul.off: sensor óptico para la medición del filamento y sistema de guiado del filamento.
- Filafab winder: sistema de bobinado del filamento.

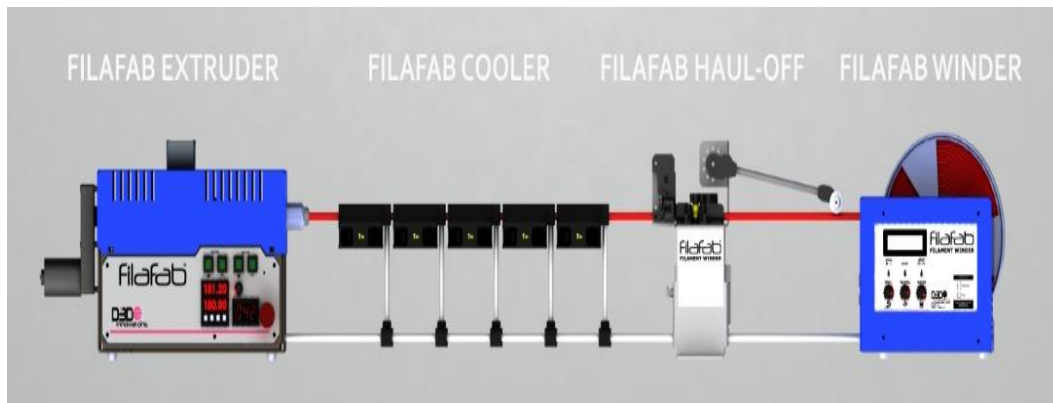


Figura 31. Componentes de la Filafab PRO 350 EX Series Fuente [11]

- **Wellzoom [12]**

Le extrusora de filamento Wellzoom es distribuida por la empresa china Shenzen Mistar Technology Co., Ltd. Esta empresa tiene el objetivo de desarrollar productos de alta tecnología para el mundo de la Impresión 3D entre otros mejorando el rendimiento de los productos y la tecnología de fabricación de forma continua, proporcionando una mejor experiencia al cliente.

El sistema de extrusión Wellzoom está formada por los siguientes componentes:

- Wellzoom C Extruder: sistema de extrusión.
- Water Cooling Tractor: sistema de enfriamiento de filamento por agua.
- Auto-Winder: cuenta con un sistema de medición de filamento con sensor óptico y sistema de arrastre además del soporte para bobinas.



Figura 32. Wellzoom C Extruder (dcha.), Water Cooling Tractor (centro) Auto-Winder (izda.)  
Fuente [12]

- **Noztek [13]**

La filamentadora Noztek es distribuida por la empresa inglesa Noztek con sede en Sussex. Desde la primera Noztek Pro en 2013, la compañía ha evolucionado hasta llegar a producir máquinas que van desde equipos de secado y extrusoras, hasta bobinadoras y peletizadoras.

El sistema de extrusión Noztek está formado por los siguientes componentes:

- Xcalibur extruder: sistema de extrusión
- Sistema de enfriamiento: sistema de enfriamiento mediante baño con agua
- Sistema de medición y guiado: sensor óptico para medir el filamento y sistema de guiado por ruedas para el arrastre del filamento
- Sistema de bobinado



Figura 33. Xcalibur Extruder (dcha.), sistema de enfriamiento (centro) y sistema de medición, guiado y bobinado (izda.) Fuente [13]



Tal y como se ha visto a lo largo de este apartado se puede concluir que la mayor parte de las extrusoras de plástico para la fabricación de filamento que hay en el mercado actual tienen 2 cosas en común:

- Están formadas por diferentes componentes independientes entre sí: extrusora, sistema de enfriamiento y sistema de bobinado.
- La extracción de filamento se realiza de forma horizontal por lo que se requiere disponer de un espacio amplio

También se ha observado que el mercado de las filamentadoras para impresión 3D se encuentra en continuo desarrollo, ofreciendo una gran variedad de productos y de soluciones que tienen como objetivo acercar el mundo de la impresión 3D a la sociedad a la vez que se avanza hacia un futuro más sostenible.



## CAPÍTULO III: FABRICACIÓN DE FILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D

En este apartado se va a describir de manera detallada todo el proceso de fabricación de filamento para su uso en impresión 3D, desde los materiales empleados a todos los equipos que se han utilizado para llevarlo a cabo.

### 3.1. Impresión 3D

La tecnología de impresión 3D utilizada en este proyecto recibe el nombre de tecnología FDM (del inglés 'Fused Deposition Modelling', y consiste en la fabricación de piezas mediante la deposición capa a capa de un material fundido. En este caso el material fundido es un filamento plástico que es forzado a pasar a través de un fusor el cual aplica calor fundiendo el polímero. Después el material fundido es empujado a través de una boquilla y se va depositando capa a capa sobre una cama de impresión (vidrio normalmente) hasta obtener la pieza final deseada.

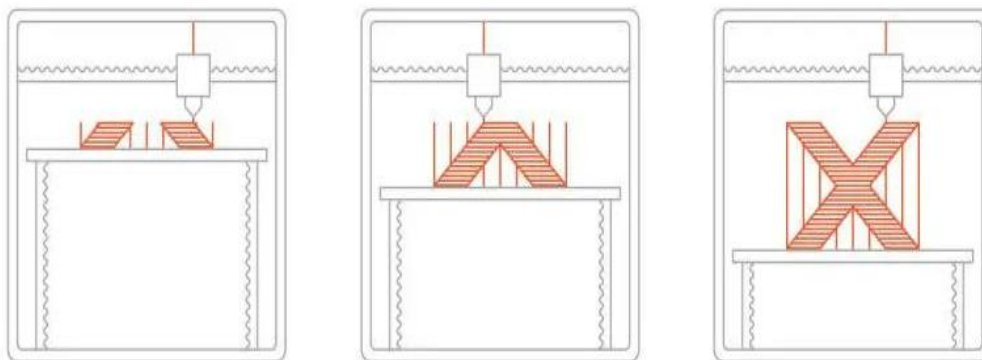


Figura 34. Esquema del proceso de impresión FDM. Fuente [14]

Para poder obtener la pieza mediante este método, se parte del diseño en CAD (Computer-Aided Design) obtenido mediante programas de diseño como "Inventor" o a través de un escáner 3D. Una vez tienes el archivo CAD, se procede a su mallado, es decir se obtiene una nube de puntos que forman la superficie exterior de la pieza y el archivo se guarda en formato .stl. Este archivo es llevado a un programa laminador como "CURA" en el cual la pieza es dividida en láminas. Una vez se ha dividido la pieza en diferentes capas, se procede a generar el archivo en formato .gcode ya que es este lenguaje el que necesita la impresora para poder fabricar la pieza. Este código que se genera está formado por todas las coordenadas que tiene que seguir la impresora para obtener el producto final. [15]



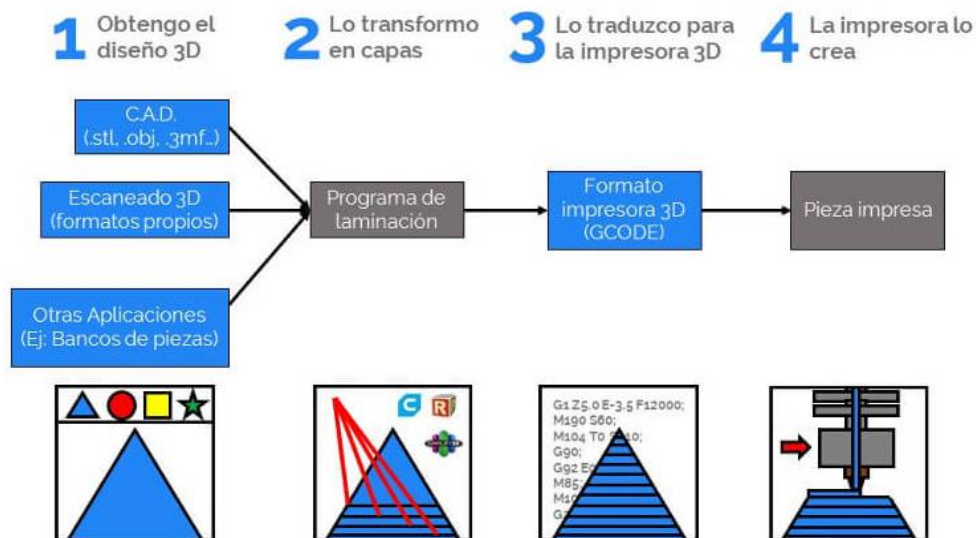


Figura 35. Diagrama de flujo para imprimir una pieza en 3D Fuente [28]

### 3.2. Materiales utilizados

- PLA [16]

El ácido poliláctico, conocido normalmente por su abreviatura PLA, es un biopolímero termoplástico que se produce a partir de la polimerización del ácido láctico y tiene su origen en materias primas naturales como el almidón de maíz o yuca y la caña de azúcar lo que le diferencia del resto de plásticos como polipropileno, ABS, polietileno que provienen del petróleo.

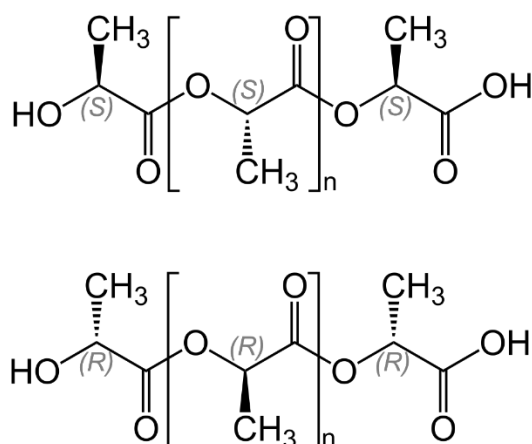


Figura 36. Unidad estructural del PLA [17]

El PLA es reciclable y biodegradable bajo ciertas condiciones de temperatura y humedad. Además, es uno de los filamentos más utilizados tanto en extrusión como en impresión 3D debido a su facilidad de procesamiento y a su bajo coste, aunque normalmente se utiliza para la fabricación de prototipos que no requieran una gran resistencia mecánica.

- Polipropileno [18]

El polipropileno (PP) es un polímero termoplástico y semicristalino que se obtiene a partir de la polimerización del propileno.



Figura 37. Obtención del polipropileno a partir de la polimerización del propileno. [19]

Es uno de los termoplásticos más utilizados en la industria debido a las siguientes propiedades: gran ligereza, baja fricción, bajo coste, buena resistencia a los productos químicos, alta resistencia al impacto, además de ser aislante eléctrico e hidrófobo.

Gracias a todas estas características cada vez es más utilizado en el sector de la impresión 3D, aunque presenta una serie de inconvenientes a la hora de procesarlo. Al tratarse de un material semicristalino hay que tener un control preciso de la temperatura durante el proceso, además, es un material que posee una contracción muy grande por lo que es necesario utilizar una cámara de calentamiento para poder imprimirlo evitando así que las piezas se deformen (fenómeno “warping”), y por último, se trata de un polímero que tiene poca adherencia a algunas superficies por lo que muchas veces hay que colocar pegamentos o lacas especiales para que se adhiera a la cama de impresión.

- PETG [20]

El PETG es un copolímero termoplástico que se obtiene a partir de la polimerización del PET. Este proceso se basa en agregar ciclohexanodimetanol (CHDM) en lugar de etilenglicol cambiando así la estructura química consiguiendo frenar la cristalización cuando le agregamos calor por lo que posee una alta dureza y flexibilidad, además de transparencia y elevada resistencia química. Debido a su estabilidad térmica y a la facilidad de extrusión, el PETG es cada vez más utilizado en la industria de la impresión 3D. Se caracteriza por tener una funcionalidad similar al ABS y una facilidad de impresión similar al PLA.



Figura 38. Pellets de PLA (izda), PETG(centro) y PP(dcha) Fuente Propia

### 3.3. Máquina de secado: Airid Polymer Dryer [6] [21]

Los materiales poliméricos tienden a retener la humedad. Este fenómeno se conoce como higroscopicidad, por lo que un polímero será más o menos higroscópico en función de la polaridad que tengas las moléculas que forman su estructura. Así los polímeros se pueden dividir en dos grupos en función de la higroscopicidad:

- Higroscópicos: aquellos que poseen un desequilibrio en la carga de las moléculas y debido a ello forman un enlace de hidrógeno con las moléculas de agua, provocando así que ésta penetre en el interior del plástico. Ejemplos de este tipo son: ácido poliláctico (PLA), policarbonato (PC), tereftalato de polietileno (PET), ABS., etc...
- No higroscópicos: aquellos plásticos que se consideran apolares y que no absorben el agua en su estructura, sino que ésta solamente se encuentra en la superficie de los mismos. Ejemplos de este tipo son: polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), PVC, etc...

En este caso particular la humedad tanto en el interior como en el exterior del polímero es un problema ya que afecta tanto a la calidad funcional y estética del producto como al proceso de extrusión y posterior impresión 3D. Por un lado, la presencia de humedad en los gránulos del polímero puede hacer que el filamento obtenido tenga burbujas en su interior, debido a que el agua se ha evaporado y ha quedado atrapado en el interior del plástico, lo que provocaría problemas en la posterior impresión. Por otro lado, un problema que puede surgir debido a la humedad es la hidrólisis del agua contenida en el plástico que hace que los enlaces covalentes de las cadenas poliméricas se rompan reduciendo así el peso molecular del polímero y su resistencia mecánica.

Para evitar este problema de humedad, antes de llevar a cabo el proceso de extrusión, los gránulos de plástico son sometidos a un pre-secado.

Para ello se utilizará la secadora modelo Airid Polymer Dryer de la compañía holandesa 3devo.



Figura 39. Máquina de secado de polímeros Airid Polymer Dryer Fuente [22]

Este equipo está diseñado para secar el plástico mediante aire caliente y agitación. Para ello dispone de un ventilador que hace circular el aire caliente hacia la tolva, donde se encuentran en agitación los gránulos del polímero gracias a la acción del rotor. La secadora dispone de una interfaz para el usuario donde se pueden elegir las condiciones de secado del material (tiempo, temperatura y velocidad del rotor) así como el tipo de plástico que se quiere secar (gránulos o triturado) y la cantidad.

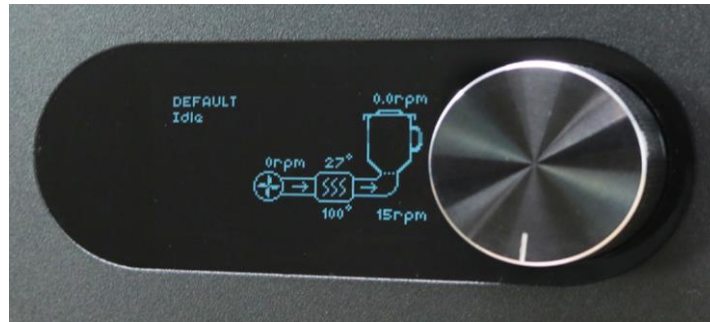


Figura 40. Interfaz del usuario (Airid Polymer Dryer) Fuente [22]

### 3.4. Máquina extrusora de filamento: Filament Maker Precision 350 [22]

Tal y como se ha visto en el apartado 2.6 existe en el mercado una gran variedad de máquinas extrusoras de bajo coste que permiten fabricar tu propio filamento de impresión 3D. En este caso el equipo utilizado para tal fin del que se dispone en el laboratorio es la filamentadora modelo “Filament Maker Precision 350” de la empresa holandesa 3devo.

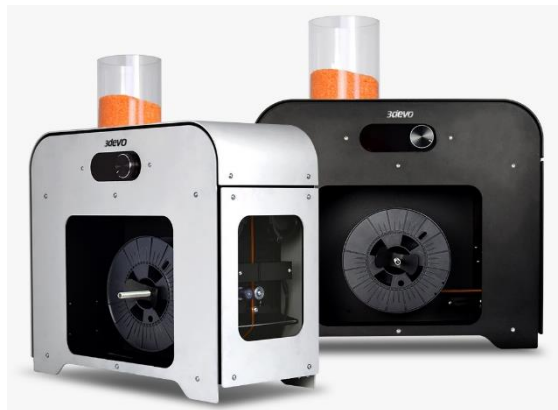


Figura 41. Extrusoras de filamento 3devo (Composer y Precision Series) Fuente [22]

Esta filamentadora destaca sobre el resto de las que hay en el mercado debido a su línea de extrusión todo en uno, que permite que el espacio que se requiere para trabajar sea mucho menor. Además, es la única que cuenta con una configuración de extrusión vertical que garantiza una precisa redondez del filamento y posterior guiado hasta la bobina.

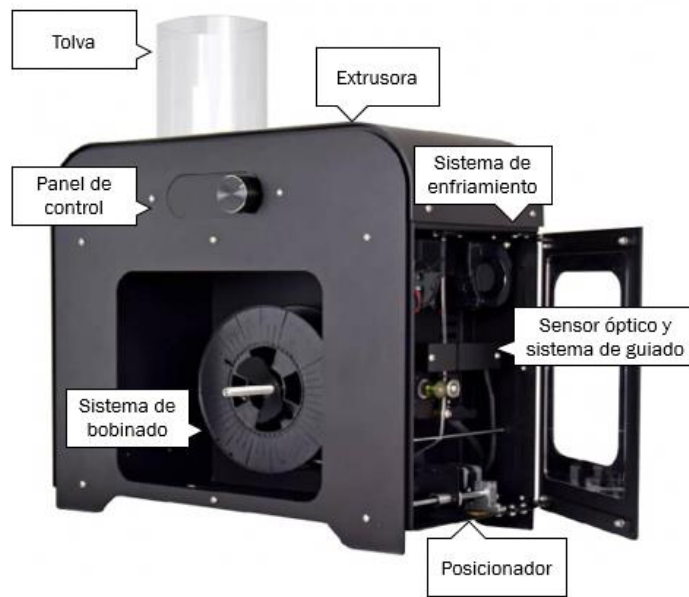


Figura 42. Partes de la filamentadora 3devo Precision 350 Fuente [22]

En la figura anterior se pueden observar las diferentes zonas o partes en las que se divide la máquina extrusora que se va a usar. A continuación, se explica brevemente que elementos contienen y que función asumen en el proceso de obtención de filamento plástico.

- **Panel de control**

El panel de control permite seleccionar y modificar todos los principales parámetros de operación requeridos para llevar a cabo el proceso de extrusión que son:

- Velocidad del tornillo sinfín (rpm)
- Temperaturas de las 4 zonas a lo largo del cilindro H1-H4 (°C)
- Diámetro del filamento que se quiere obtener (mm)
- Velocidad de los ventiladores del sistema de enfriamiento (%)

Además, en la pantalla se pueden visualizar estos valores en tiempo real.

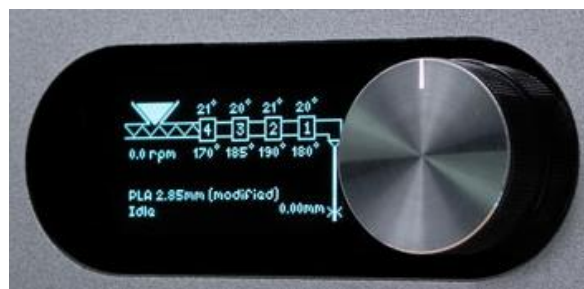


Figura 43. Panel de control Fuente [22]

○ Tolva

La tolva es la zona a través de la cual el plástico es introducido al sistema de extrusión. Cuenta con un sensor óptico para comprobar el nivel de material que hay en la misma (esto se puede observar en el panel de control), y también con una rejilla de seguridad para impedir que entren objetos no deseados en el sistema de extrusión como podría ser un lapicero/bolígrafo, por ejemplo, que podrían causar graves problemas.

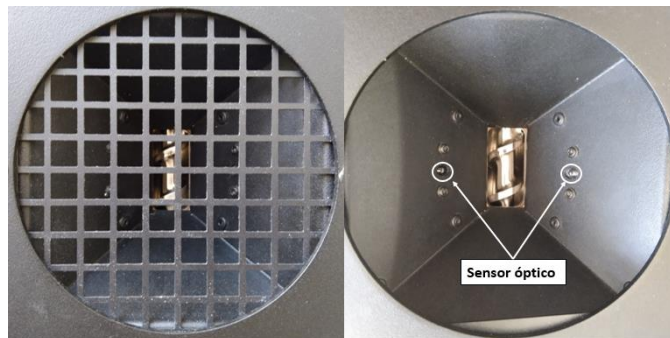


Figura 44. Tolva con rejilla (izda.) y tolva sin rejilla (dcha.). Fuente Propia

○ Extrusora

La zona de la extrusora está formada principalmente por el sistema motor-reductora-tornillo sinfín-cilindro con la boquilla de salida situada en la parte final del barrel. Exceptuando la zona donde se coloca la tolva (principio del cilindro), el resto se encuentra protegido por lana de vidrio que sirve como aislante térmico para evitar la pérdida de calor. A lo largo del cilindro se encuentran los 4 calentadores que pueden alcanzar una temperatura máxima de 350 °C.

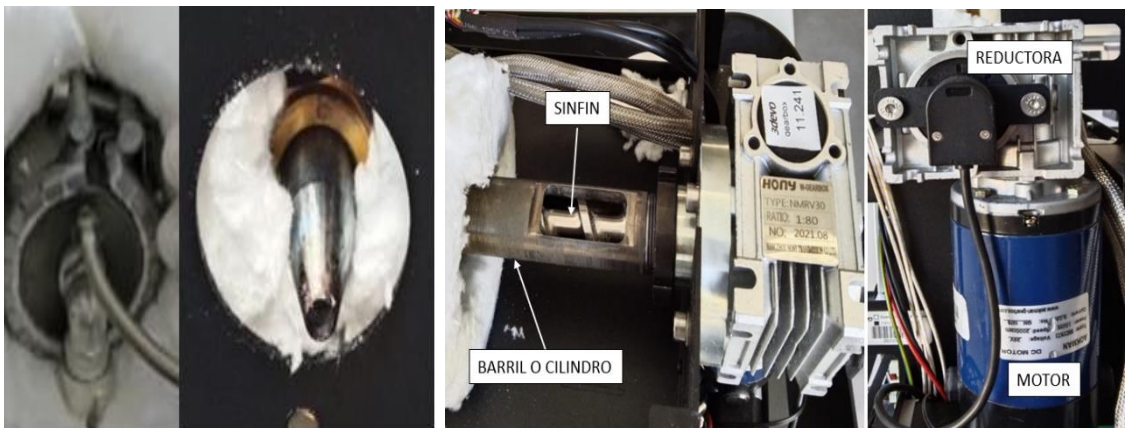


Figura 45. Vista superior e inferior de la boquilla (fuente propia)

Figura 46. Sistema motor-reductora/sinfín/cilindro (fuente propia)

El tornillo sinfín está fabricado en acero endurecido, lo que le confiere una mayor resistencia, permitiendo el uso de polímeros que estén reforzados con fibras de vidrio o de carbono, por ejemplo.



Figura 47. Tornillo sinfín Fuente [22]

#### ○ Sistema de enfriamiento

Esta parte está formada por un sistema de doble ventilador que permite lograr una distribución uniforme del aire y que además cuenta con un ajuste del ángulo del ventilador para conseguir un flujo óptimo. No es recomendable orientar los ventiladores hacia la boquilla ya que pueden enfriarla modificando así las condiciones del proceso, sino que lo mejor es orientar los ventiladores tal y como se muestra en la Figura 48.



Figura 48. Orientación recomendada de los ventiladores (Fuente propia)

#### ○ Sensor óptico y sistema de guiado

El sistema de medición cuenta con un sensor óptico que mide el diámetro del filamento obtenido de forma precisa entre 0,5 mm y 3 mm (43 micras de precisión). El sensor tiene la ubicación ideal para asegurar la redondez del filamento. Por su parte el sistema de extracción consta de dos ruedas que arrastran el filamento y cuenta con un ajuste automático de la velocidad para tener un control preciso del diámetro.



En resumen, estos dos sistemas se combinan para lograr una tolerancia de precisión del diámetro de  $\pm 0,05$  mm.

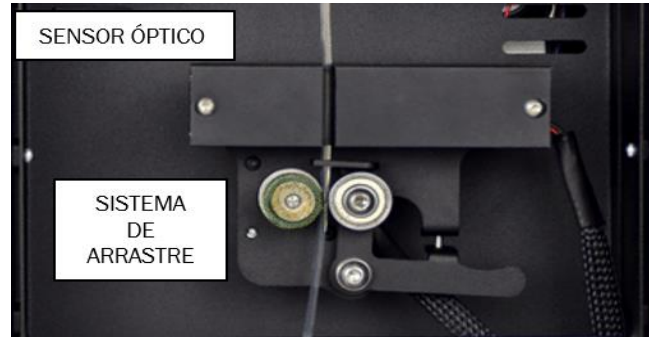


Figura 49. Sensor óptico y sistema de arrastre  
Fuente [22]

- **Posicionador**

Este sistema cuenta con un posicionador de filamento ajustable con una anchura máxima de bobina de 120mm, y cuenta con un brazo retráctil para lograr una bobina de aspecto agradable evitando así los enredos en el filamento que podrían dificultar la posterior impresión 3D. El tamaño de bobina se puede establecer en el propio panel de control.

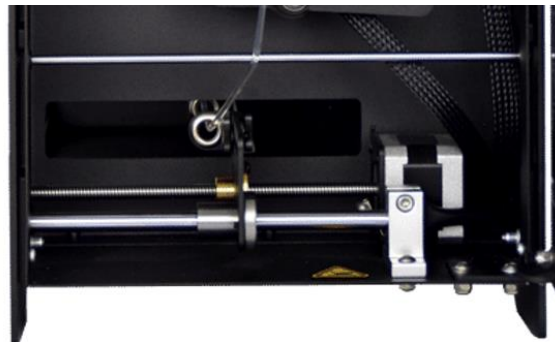


Figura 50. Posicionador de filamento Fuente [22]

- **Sistema de bobinado**

Este sistema es automático y se controla desde el panel de control. Dispone de un soporte para bobinas intercambiable que permite cambiar rápidamente una bobina por otra. Además, cuenta con un embrague deslizante en la parte de atrás para poder ajustar la tensión del bobinado. Es adaptable a bobinas que tengan un diámetro máximo de 240 mm y un ancho máximo de 120 mm.

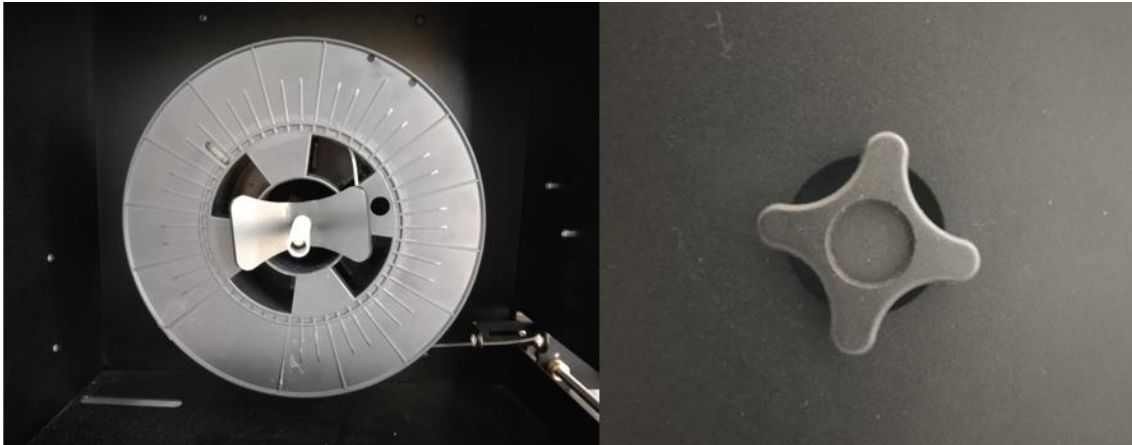


Figura 51. Sistema de bobinado de filamento (izda.) y embrague deslizante (dcha.) Fuente propia

En los Anexos se puede encontrar una tabla comparativa entre la filamentadora usada y las que se han comentado en el apartado 2.6.

Otra de las ventajas que presenta esta máquina extrusora de filamento es que ofrece la posibilidad de conexión mediante cable USB al ordenador. Esta máquina cuenta con su propio software gratuito llamado Devovision. En la siguiente figura se puede observar una captura de pantalla realizada durante uno de los experimentos que se han llevado a cabo. En la misma se muestran diferentes gráficas con los principales parámetros del proceso en tiempo real como son temperaturas de los calentadores, diámetro del filamento, velocidad del husillo, corriente del motor, así como la velocidad de las ruedas de arrastre.



Figura 52. Pantalla de visualización de la Interfaz del software Devovision. Gráfica del diámetro del filamento. (Fuente propia)

### 3.5. Experimentos realizados

En este apartado se va a explicar la metodología que se ha seguido para crear las diferentes bobinas de filamento plástico para impresión 3D, sí como los problemas que han surgido durante dichos experimentos.

#### 3.5.1. Metodología seguida [6]

- **Secado**

Para la obtención del filamento, lo primero que se debe hacer es someter el plástico en forma de pellet o gránulos a un secado. Para ello utilizaremos la secadora Airid Polymer Dryer explicada en el apartado 3.3 Los parámetros de secado (temperatura y tiempo) dependerán del material utilizado y cada fabricante debe indicar estos valores en la ficha técnica del producto. En la siguiente tabla se verán estos valores para cada uno de los materiales que se han empleado en este caso:

*Tabla 5. Temperatura y tiempo de secado del PLA, PP y PETG utilizados.*

Material	Temperatura (°c)	Tiempo (h)
PLA	80	4
PP	80	2
PETG	65	6

- **Proceso de extrusión**

Una vez se ha procedido al proceso de secado, se lleva a cabo el procedimiento de fabricación del filamento. Para ello, lo primero que se hace es conectar la máquina a la red eléctrica, así como al ordenador para poder recoger todos los datos en tiempo real. Una vez hecho esto se seleccionan en el panel de control de la extrusora “Filament Maker Precision 350” todos los parámetros de operación: diámetro del filamento, temperaturas de los 4 calentadores, velocidad del husillo y velocidad de los ventiladores. En el propio panel de control de la filamentadora se pueden encontrar diferentes parámetros establecidos para diferentes materiales, como por ejemplo el PLA, que pueden ayudar a seleccionar los parámetros óptimos de operación. Sin embargo, esto no es recomendable ya que siempre se tienen diferentes grados dentro de cada material por lo que lo óptimo es ir realizando un ajuste manual durante el proceso.



Para realizar este ajuste óptimo, se siguen los siguientes pasos:

- Se selecciona la temperatura de los 4 calentadores un 10-20% por encima del valor del punto de fusión del material para asegurarnos de este modo de que el material esté fundido en todo momento.
- Se selecciona la velocidad del sinfín en un valor entre 3 rpm y 6 rpm. Típicamente 5 rpm es un buen valor para empezar.
- Una vez se obtenga un flujo de material a través de la boquilla, se selecciona el valor de la velocidad de los ventiladores. Este valor suele estar entre el 10% y el 80%, dependiendo del material con el que se esté trabajando.
- Una vez se hayan seleccionado estos parámetros iniciales, se coloca el filamento en el extractor para que así el sensor óptico empiece a leer el diámetro del filamento.
- Una vez iniciado el proceso de medición, se esperan entre 10 y 20 minutos hasta que el diámetro se estabilice y se ajustan las temperaturas (disminuyéndolas 5 °C) y se va iterando hasta que se tenga el diámetro requerido (1,75 mm). En resumen, se disminuye las temperaturas 5 °C y se espera, se disminuye y se espera, y así hasta que se encuentre el punto óptimo en el que el diámetro se ajuste al valor que se quiere.
- A continuación, se ajusta la velocidad hasta encontrar un valor que permita obtener el flujo más estable.
- Durante todo el experimento se va a ir ajustando la velocidad de los ventiladores hasta obtener aquella en la que el plástico se enfríe de forma óptima para que el diámetro obtenido se mantenga estable.
- Finalmente se realiza un ajuste fino que consiste en cambiar individualmente la temperatura de cada uno de los calentadores (de 5 °C en 5 °C).

○ **Bobinado**

Una vez que se han encontrado los parámetros óptimos de operación en los que el proceso es estable, se puede proceder al bobinado del filamento. Este proceso también es importante ya que, si no se lleva a cabo de forma correcta, influye en la calidad del filamento obtenido. Para ello se deben de introducir correctamente las dimensiones de la bobina en el panel de control. Una vez hecho esto se procede a bobinar el filamento asegurando que la tensión en la bobina sea la correcta evitando así que el filamento se estire demasiado.

Una vez que se ha iniciado esta operación, solamente queda esperar hasta que la bobina esté llena para proceder a retirarla y poner otra nueva o finalizar el proceso.

- **Limpieza del equipo**

La limpieza de la filamentadora después de cada uso es imprescindible para evitar la degradación del material y la consiguiente obstrucción irreversible del barril. El material plástico que queda dentro del cilindro después de cada experimento puede permanecer caliente durante 2 horas, degradándose llegando a cristalizarse irreversiblemente provocando un atasco difícil de solucionar. Para ello se utilizan materiales de limpieza/purga especiales para evitarlo. En este caso el material utilizado es el Devoclean MidTemp EZ que ha sido proporcionado por la propia empresa 3devo.

Este paso de purga consiste simplemente en introducir a través de la tolva los pellets de limpieza utilizando los mismos parámetros de operación que estaban para el material anterior. Este proceso de purga se lleva a cabo durante 15-20 minutos para asegurar que todo el plástico anterior ha salido.

Como excepción, los únicos materiales que se pueden dejar dentro del barril entre experimentos son: PLA virgen, HDPE y Devoclean MidTemp EZ.



*Figura 53. Proceso de purga de la filamentadora Fuente Propia*

### 3.5.2. Filamento de PLA (3devo)

Los primeros experimentos que se llevaron a cabo fueron con PLA, ya que es un material bastante fácil de procesar. El PLA utilizado fue proporcionado por la empresa 3devo por lo que se utilizaron los parámetros preestablecidos en la filamentadora siguiendo su consejo. Las propiedades del PLA de 3devo son las siguientes:

Tabla 6. Propiedades del PLA 3devo [6]

	Densidad	MFI	Módulo elástico	Elongación a rotura
<b>PLA 3DEVO</b>	1,24 g/cm <sup>3</sup>	6 g/10min	3800 MPa	6%

Tabla 7. Parámetros de operación para el PLA 3devo (1,75 mm)

Parámetro	H4	H3	H2	H1	Velocidad sinfín (rpm)	Velocidad ventilación(%)
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)		
<b>Valor establecido</b>	170	185	190	170	3,5	80

Con estos parámetros se fabricó la primera bobina de PLA de 1,75 mm con una tolerancia de  $\pm 50 \mu\text{m}$  que es la tolerancia que tienen la mayoría de los filamentos industriales. A continuación, se pueden observar las gráficas proporcionadas por la aplicación del diámetro del filamento, velocidad del husillo, corriente del motor y velocidad del extractor.

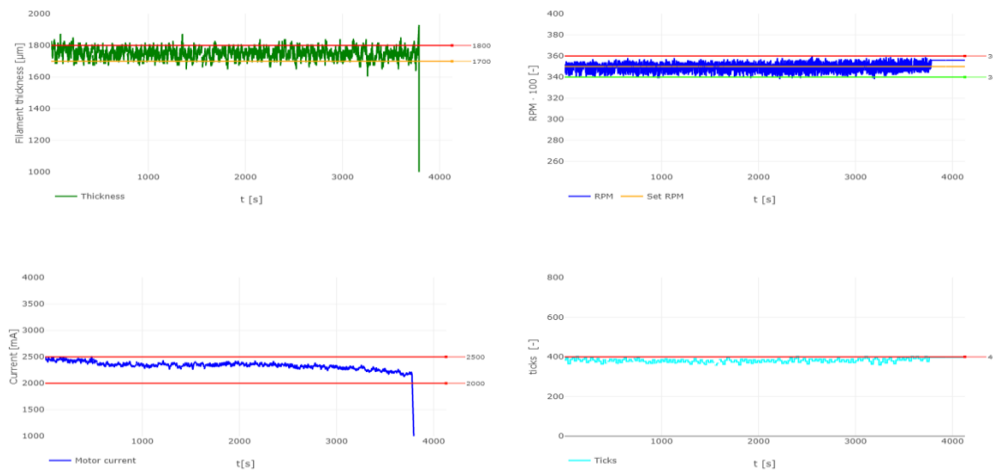


Figura 54. Gráficas del diámetro de filamento, velocidad del husillo, corriente del motor y velocidad el extractor (PLA 1,75 mm) Fuente Propia

Tal como se ha dicho anteriormente se puede ver que el diámetro se mantiene en un valor de  $1,75 \pm 50 \mu\text{m}$ , el valor de la velocidad del sinfín se mantiene constante en un valor de  $3,5 \pm 0,1 \text{ rpm}$  y la corriente del motor también se mantiene estable y entre 2000-2500 mA (valores normales de operación según fabricante).

Después de realizar esta primera prueba, se procedió a realizar una bobina del mismo material, pero esta vez el objetivo era conseguir una bobina de 2,85 mm. Para ello se seleccionaron los parámetros que venían por defecto en la filamentadora.

Tabla 8. Parámetros de operación para el PLA (2,85 mm)

Parámetro	H4	H3	H2	H1	Velocidad sinfín	Velocidad ventilación
Valor establecido	170 °C	185 °C	190 °C	180 °C	5 rpm	70%

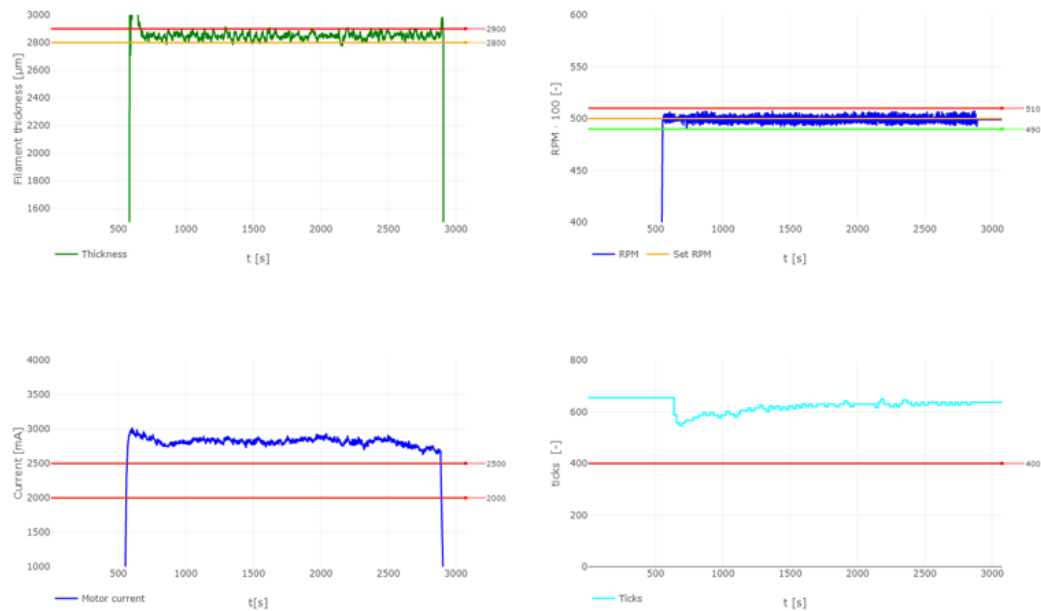


Figura 55. Gráficas del diámetro de filamento, velocidad del husillo, corriente del motor y velocidad el extractor (PLA 2,85mm) Fuente propia

En este caso también se puede observar que los parámetros de operación se mantienen estables y dentro de sus valores predefinidos.

### 3.5.3. Filamento de PETG

Una vez se habían obtenido las bobinas de PLA, se procedió a explorar otros materiales, por lo que se empezó a probar con el PETG.

Tabla 9. Propiedades del PETG [23]

	Densidad	MFI	Módulo elástico	Elongación a rotura
PETG	1,27 g/cm <sup>3</sup>	-	1920 MPa	≤ 240%

Para los parámetros del PETG, se empezó seleccionando una temperatura de 240°C en todos los calentadores, una velocidad de 5 rpm y una velocidad de ventilación del 50%. Al principio se observó que el material salía fundido, pero bastante líquido como para introducirlo en el sistema extractor, por lo que se procedió a realizar el ajuste explicando en el apartado 3.5.1, hasta obtener unos parámetros de operación óptimos para poder obtener un filamento de buena calidad.

Los parámetros obtenidos tras realizar este ajuste fueron los siguientes:

Tabla 10. Tabla 11. Parámetros de operación para el PETG (1,75 mm)

Parámetro	H4	H3	H2	H1	Velocidad sinfín	Velocidad ventilación
Valor establecido	220 °C	235 °C	230 °C	220 °C	4,3 rpm	70%

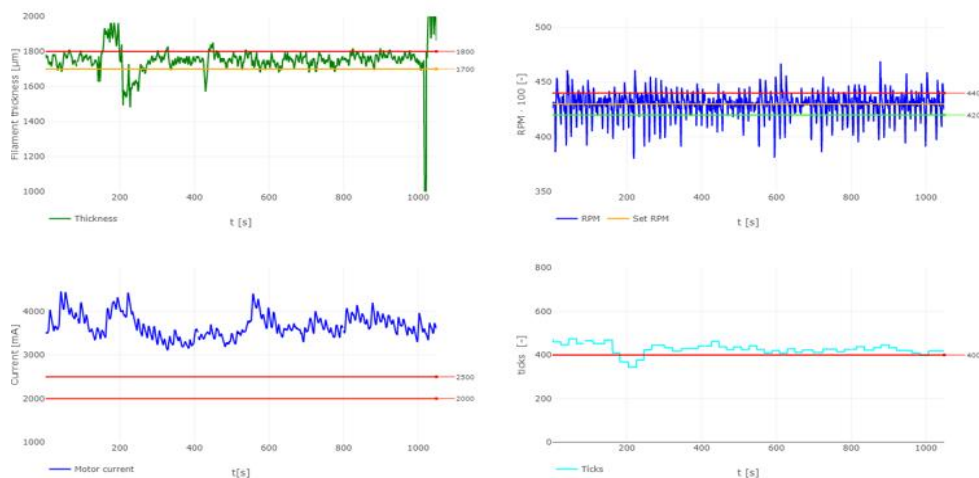


Figura 56. Gráficas del diámetro de filamento, velocidad del husillo, corriente del motor y velocidad el extractor (PETG 1,75 mm) Fuente propia



En este caso se ve que, para estos parámetros, el diámetro del filamento se mantiene dentro de los valores óptimos ( $1,75 \pm 50 \mu\text{m}$ ), sin embargo, en lo que, a velocidad del husillo y corriente del motor, se ve que no se mantienen estables sufriendo gran cantidad de picos. Esto tiene su explicación en algo que sucedió durante el experimento con PETG, que se va a explicar a continuación.

#### 3.5.4. Problemas encontrados

Durante los experimentos realizados con el PETG, hubo un momento durante el cual dejó de salir material a través de la boquilla. Esto duró más o menos un par de minutos hasta que finalmente se produjo una especie de explosión, durante la cual salió de forma repentina un material fundido de color caramelo. Inmediatamente después de esto se desconectó la máquina. La posible causa de que esto ocurriese se debe a la degradación de algún polímero que estuviese dentro del barril. Teniendo en cuenta de que hasta ese momento solamente se había trabajado con PLA virgen y PETG, se consideró que la causa de este incidente se debió a la degradación de posibles restos de PLA que hubiesen quedado dentro del cilindro que sumado a las altas temperaturas que se emplearon para el proceso de extrusión del PETG provocaron la degradación del ácido poliláctico.

- Degradación del PLA

La degradación de un material plástico se define como el cambio en las propiedades del mismo bajo la influencia de factores como el calor, oxígeno, productos químicos o luz. En este caso la degradación fue producida por la acción del calor, ya que este material estuvo a temperaturas elevadas durante un tiempo elevado. Esta degradación provocó que el proceso de extrusión del PETG no se realizase de forma correcta conllevando al atasco del barril y consiguiente explosión. En la siguiente imagen se pueden ver las consecuencias del accidente.



Figura 57. PLA degradado que provocó el accidente Fuente propia

Después de que se produjese esta explosión, se llevó a cabo una purga del equipo para así conseguir extraer el material degradado todo lo posible. Para ello se seleccionó una temperatura de 190 °C en todos los calentadores y se procedió a introducir el material de limpieza (Devoclean MidTemp EZ). Al principio el material salía sucio, y se llevó a cabo la limpieza hasta que no saliese más suciedad.



*Figura 58. Material de purga mezclado con plástico degradado. Fuente propia*

Después de realizar esta purga, se contactó con la empresa 3devo para ver cómo solucionar de la mejor manera posible este problema, ya que probablemente tanto el tornillo como el barril estuviesen aún contaminados. Después de hablar con uno de sus expertos en materiales, su recomendación fue realizar una purga de alto nivel, con un material de limpieza que trabaja a temperaturas más altas (hasta 350°C) llamado Devoclean HighTemp EZ. Una vez se recibió el material se procedió a realizar esta fase de limpieza.



*Figura 59. Devoclean MidTemp (izda.) y Devoclean HighTemp (dcha.) Fuente propia*

Se observó que el material salía bastante negro, probablemente debido a que al trabajar con temperaturas tan altas (alrededor de 350°C) el posible material que quedaba en el barril se carbonizó y salió mezclado con el material de purga además de provocar la expulsión de humo.



Figura 60. Purga de alto nivel. I Fuente propia

Después de realizar este proceso de limpieza, se llevó a cabo la realización de un control de calidad de la extrusora empleando PLA. Para ello se utilizan los pellets de ácido poliláctico proporcionados por 3devo y se seleccionan los parámetros definidos en la máquina extrusora para el PLA de 1,75mm. Al llevar a cabo esta operación se observó que la corriente del motor era inusualmente baja, menor de 1500 mA. Esto es debido a que todavía seguía habiendo contaminación en el interior del barril, por lo que la fricción entre el husillo y el barril no era adecuada, provocando también que la mezcla del plástico en el interior de la extrusora no se llevase a cabo de forma correcta.

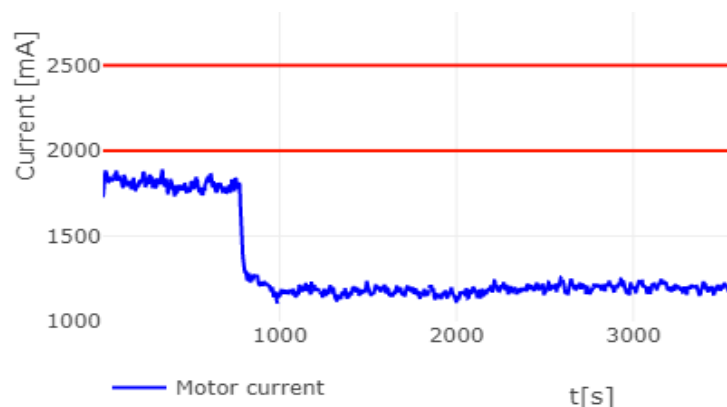


Figura 61. Corriente del motor después de la purga de alto nivel. Fuente propia

La única opción que quedaba era desmontar la filamentadora, para sacar así el husillo y poder ver su estado, así como el interior del barril. Así que una vez consultado esto con 3devo se desmontó la extrusora, siguiendo el manual que se encontraba en la página web.

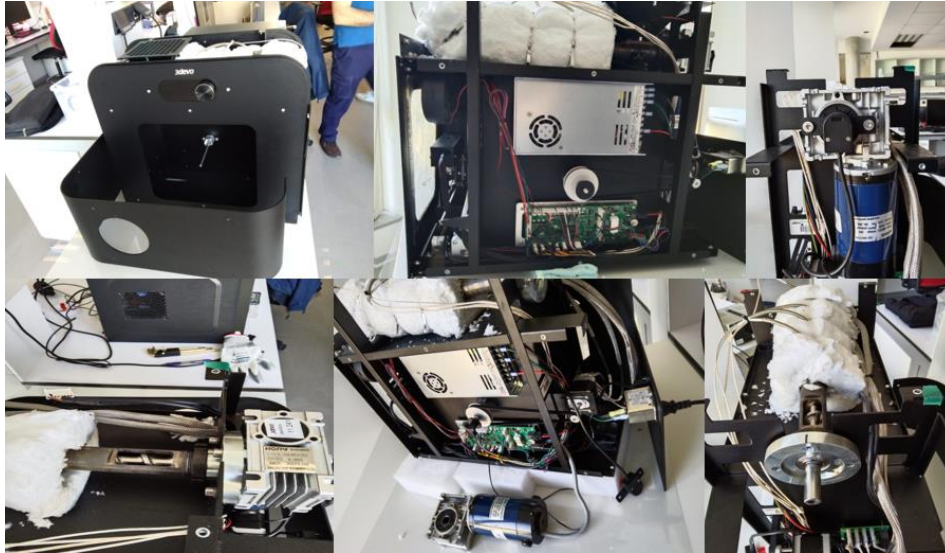


Figura 62. Desmontaje de la filamentadora paso a paso. Fuente propia

Una vez se extrajo el tornillo sinfín se pudo observar que estaba bastante contaminado, y que tenía una capa de plástico carbonizado en su superficie. Además, también se podía observar cómo había algo de contaminación en la parte final del barril.



Figura 63. Tornillo sinfín contaminado. Fuente propia.

Para poder limpiar el husillo y así poder dejarlo como al principio, se utilizó una pistola de calor para poder derretir los restos de plástico blanco que quedaban, mientras que para eliminar los restos de plástico carbonizado (negro) se sumergió el tornillo sinfín en acetona y se dejó 24 horas, pasadas las cuales se había eliminado la mayor parte de la contaminación. Finalmente, para dejar ya el tornillo limpio del todo se usó una fresadora con un cabezal apropiado para pulir el husillo.



Figura 64. Tornillo sinfín carbonizado (izda) y tornillo sinfín limpio y pulido (dcha) Fuente propia



Figura 65. Fresadora con cabezal puesto para pulir el husillo Fuente propia

Una vez limpio el husillo, se montó de nuevo la filamentadora, intentando limpiar el barril todo lo posible calentándolo y usando la ayuda del husillo. A continuación, se volvió a realizar un control de calidad con el PLA. Se observó que después de limpiar el tornillo y el barril todo lo posible, la corriente del motor volvió a ser estable y se mantuvo dentro de los valores normales (2000-2500 mA) aunque sensiblemente más bajo que en el primer experimento que se realizó con PLA. A partir de este control de calidad se realizaron diferentes experimentos con PLA para así poder ver si realmente se había logrado poner a punto la filamentadora.

Para ello se utilizó un PLA diferente al proporcionado con 3devo, por lo que la selección de los parámetros se realizó de forma manual tal y como se explicó en el apartado 3.5.1.

### 3.5.5. Filamento de PLA (SmartMaterials 3D)

Tal y como se ha comentado, en este apartado se van mostrar los diferentes experimentos llevados a cabo con un PLA diferente al de 3devo. Los experimentos se han realizado utilizando diferentes parámetros para observar la incidencia que tienen sobre la calidad del producto final exceptuando el diámetro del filamento que será siempre de 1,75 mm.

Las propiedades del PLA utilizado son las siguientes:

Tabla 12. Propiedades del PLA Smartmaterials3D [23]

Material	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	MFI (g/10min)	Módulo elástico (MPa)	Elongación a rotura (%)
PLA Smartmaterials 3D	1,24	-	3800	6

Experimento	Diámetro (mm)	H4 (°C)	H3 (°C)	H2 (°C)	H1 (°C)	Velocidad sinfín (rpm)	Velocidad ventilación (%)
1	1,75	170	185	190	170	4,5	70
2	1,75	170	190	195	175	4,5	70
3	1,75	170	180	185	170	4,5	70
4	1,75	170	185	190	170	3,5	70
5	1,75	170	185	190	170	3,5	70
6	1,75	170	185	190	170	3,5	80

Tabla 13. Parámetros elegidos para los experimentos con PLA Smartmaterials3D

El análisis de los diferentes filamentos obtenidos, así como de la influencia de los distintos parámetros: temperaturas, velocidad del sinfín y ventilación; se verá en el capítulo CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DEL FILAMENTO OBTENIDO.

### 3.5.6. Filamento de PP

Por último, se procedió a la experimentación con polipropileno, ya que como se ha dicho en el apartado 3.2 presenta una serie de propiedades tanto químicas como mecánicas que lo hacen excelente para su uso en diferentes aplicaciones.

Tabla 14. Propiedades del PP

	Densidad	MFI	Módulo elástico
PP	0,9 g/cm <sup>3</sup>	20	450 MPa

En este caso el procedimiento elegido para la fabricación del filamento de PP es el indicado en el apartado 3.5.1 Para ello se empezó utilizando una temperatura de 200 °C en todos los calentadores, una velocidad del tornillo de 5 rpm y una ventilación del 50%. Al principio se observó que con temperaturas tan altas el material salía bastante líquido y no se podía introducir en el extractor para poder darle forma y medir el diámetro. Continuando con el ajuste, se fueron bajando paulatinamente las temperaturas hasta 170 °C, temperatura a la cual se obtuvo un flujo estable para poder empezar a producir el filamento. A partir de estas temperaturas, se realizaron diversos experimentos en el que se cambiaron los parámetros principales del proceso para poder observar su influencia sobre la calidad del filamento obtenido. Esto al igual que con el PLA se discutirá en el CAPÍTULO III: FABRICACIÓN DE FILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D

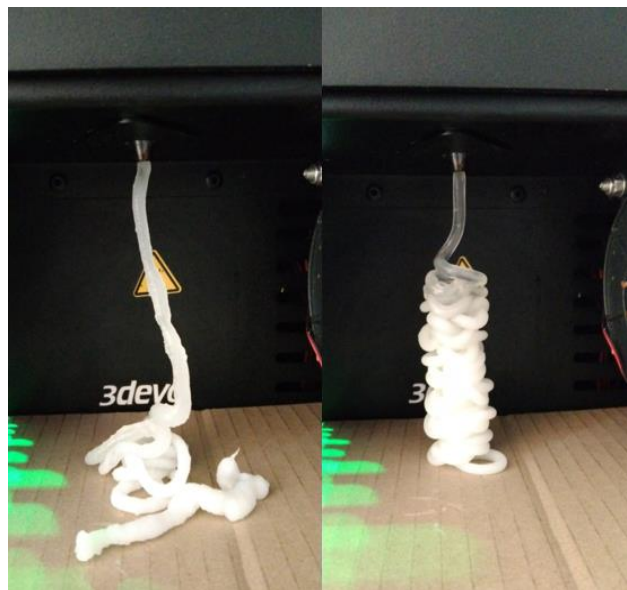


Figura 66 . Flujo de PP a 190 °C (izda.) y a 170 °C (dcha.)

Tabla 15. Parámetros elegidos para los experimentos con PP

Experimento	H4 (°C)	H3 (°C)	H2 (°C)	H1 (°C)	Velocidad sinfín (rpm)	Velocidad ventilación (%)
1	170	170	170	170	5	50
2	170	175	175	170	5	80
3	170	175	175	170	5	90
4	170	175	175	170	4,5	90

Otro de los aspectos importantes a tener en cuenta a la hora de trabajar con el polipropileno es que se trata de un material semicristalino, con una parte amorfa y una cristalina. Cuando el material se funde, todos los cristales presentes en la parte cristalina se funden con la estructura amorfa, pero al producirse el enfriamiento una parte del filamento se vuelve cristalina encogiéndose más que la fracción amorfa. Esto se acentúa aún más en el sistema de doble ventilador unidireccional con el que se trabaja ya que el filamento se va a enfriar más en una dirección que en otra, lo que hace que el filamento obtenido tenga una forma ovalada en vez de circular. Además de éste fenómeno el filamento se puede ovalar debido a la acción de las ruedas del extractor, que pueden aplastar el filamento si no está lo suficientemente frío.

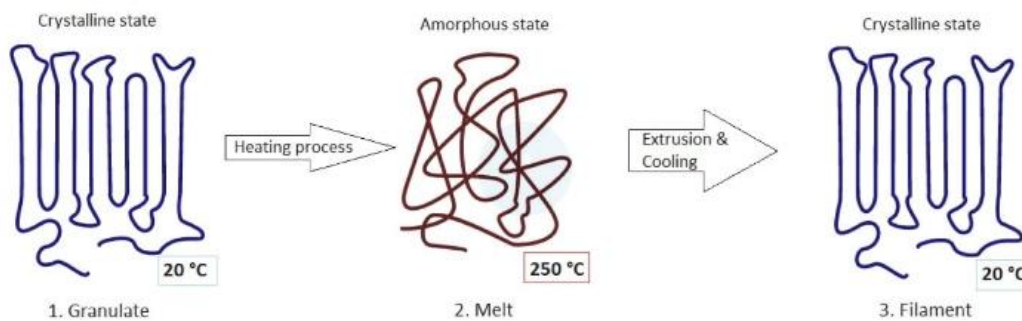


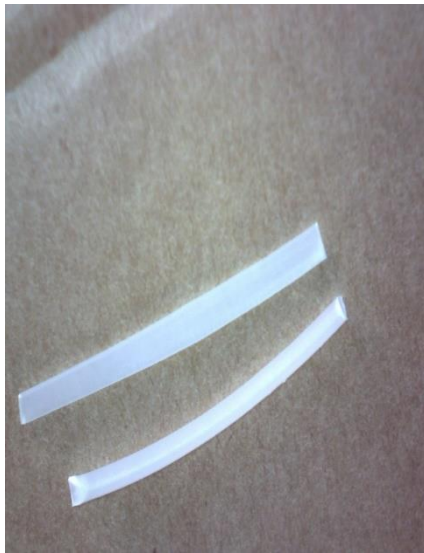
Figura 67. Esquema del cambio en la estructura del polímero durante el proceso de extrusión [6]

Las posibles soluciones para evitar que el filamento salga ovalado son:

- Trabajar con temperaturas lo suficientemente bajas para limitar el uso de enfriamiento.
- Utilizar un prototipo que convierte el flujo unidireccional en un flujo circular.



Durante estos experimentos se probó el prototipo para hacer el flujo circular, pero se vio que no funcionaba y apenas se conseguía enfriar el filamento lo que condujo a un filamento que era aplastado por las ruedas extractoras. Además, como se verá después, la bajada de temperaturas en este caso no hace que se necesite menos enfriamiento, sino que se han necesitado enfriamientos altos para obtener un filamento de calidad.



*Figura 68. Comparación entre filamento de PP aplastado y filamento redondo Fuente propia*



*Figura 69. Prototipo de ventilación circular Fuente propia*



Análisis de la obtención de filamento para  
impresión 3D utilizando una máquina  
extrusora de bajo coste





## CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DEL FILAMENTO OBTENIDO

En este apartado se van a analizar los diferentes filamentos obtenidos con los distintos materiales empleados. Se va a estudiar la influencia de los parámetros de operación (temperaturas, velocidad del tornillo sinfín, velocidad del sistema de enfriamiento) en la calidad del filamento obtenido.

Además, se va a analizar el proceso de impresión 3D de cada uno de los filamentos obtenidos, imprimiendo diferentes prototipos y probetas. Estas probetas serán analizadas posteriormente en una máquina de ensayos.

Antes de comenzar con el análisis, se van a explicar los equipos utilizados (Impresora 3D y máquina de ensayos) así como la metodología empleada para la obtención de las probetas y posterior ensayo.

#### 4.1. Equipo de Impresión 3D

Para la impresión 3D de las probetas de PLA (3devo y SmartMaterials3D) se ha utilizado una Impresora de bajo coste modelo Creality CR-10.

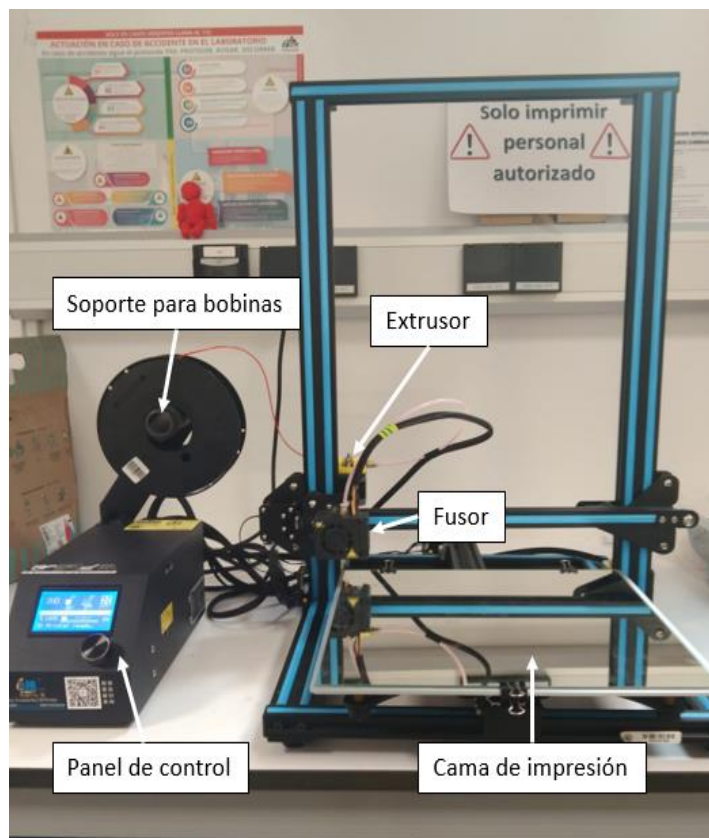


Figura 70. Impresora 3D Creality CR-10 Fuente propia

Por su parte, para la impresión 3D de las probetas de PP se ha utilizado una impresora más avanzada modelo Tumaker NX Pro Dual, que consta de una cámara cerrada para evitar pérdidas de calor con el ambiente lo que favorece la impresión del polipropileno.

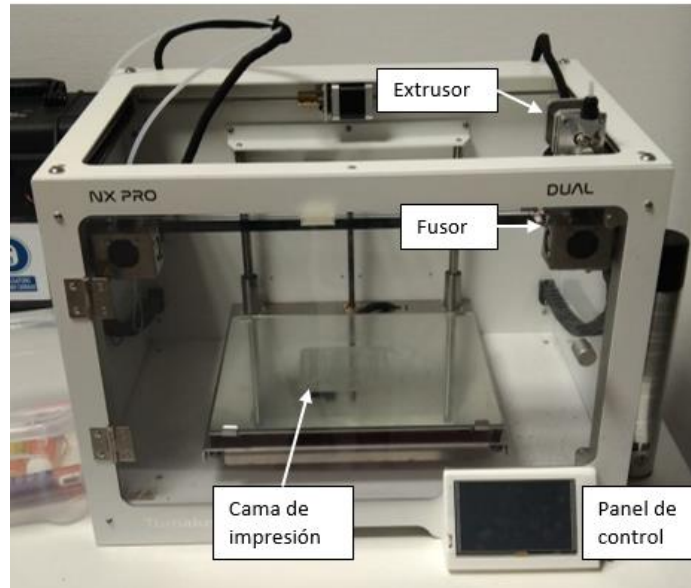


Figura 71. Figura 63. Impresora 3D Tumaker NX Pro Dual Fuente propia

Para la realización del modelo CAD de las probetas de se ha utilizado el programa AutoDesk Inventor Profesional 2019. Posteriormente se ha utilizado el programa Ultimaker Cura para dividir las probetas en capas y poder generar el formato gcode para poderlas imprimir.

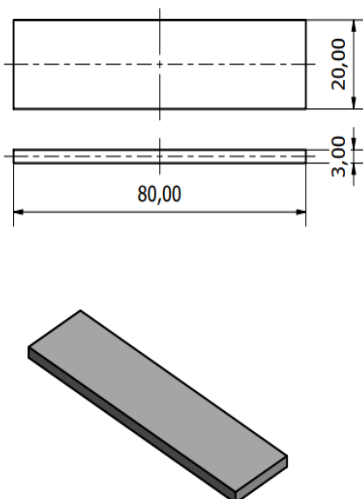


Figura 73. Geometría de las probetas (Diseño Propio)

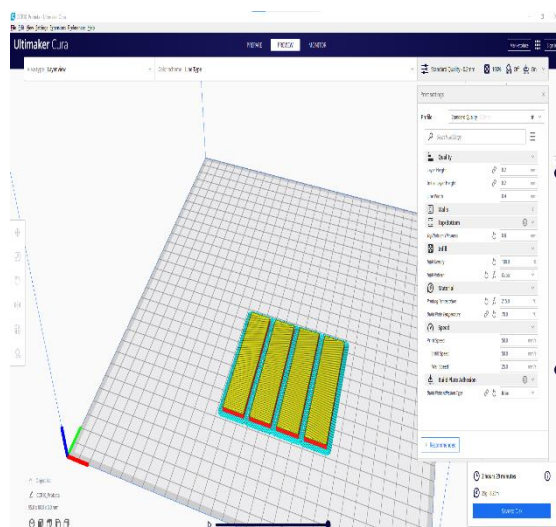


Figura 72. Vista previa de las probetas en Ultimaker Cura Fuente propia

Los parámetros de impresión principales de las probetas de PLA y de PP fueron las siguientes:

Tabla 16. Parámetros de impresión de las probetas de PLA y PP

	Diámetro de la boquilla	Altura de capa	Ancho de línea	Tipo de relleno	Densidad de relleno	Velocidad de impresión	Temperatura de impresión	Temperatura de la cama
PLA	0,4 mm	0,2 mm	0,4 mm	Cúbico	100%	50 mm/s	215 °C	70 °C
PP	0,4mm	0,2 mm	0,4 mm	Longitudinal	100%	50 mm/s	220 °C	40 °C

▪ Anisotropía en la Impresión 3D [24]

Un fenómeno común en el proceso de Impresión 3D es la anisotropía. La anisotropía se define como el comportamiento en el cual las características o las propiedades físicas de un material son diferentes en función de la dirección en la que sean medidas. Debido a este fenómeno es muy importante planificar la dirección de impresión en función del diseño de la pieza para que a la hora de realizar los ensayos a las diferentes probetas las cargas se apliquen en la misma dirección en la que va a trabajar la pieza.

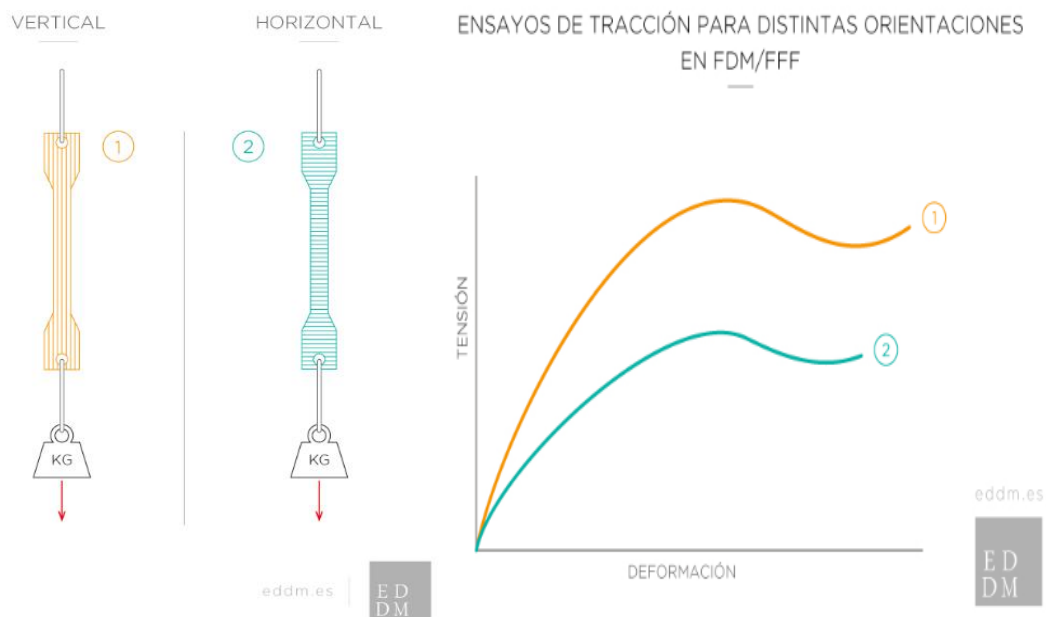


Figura 74. Ensayos de tracción en 2 probetas impresas en diferentes direcciones Fuente [24]

En este caso las probetas se han impreso en la dirección X-Y.

#### 4.2. Máquina de ensayos [25]

El equipo utilizado para ensayar las probetas es una máquina de ensayos marca Mark-10 modelo ES30. Esta máquina de ensayos puede trabajar a tracción y a compresión por lo que puede ser utilizada para ensayar probetas a tracción e incluso a flexión.

La máquina está formada por un carro móvil que se mueve gracias a la acción de un tornillo sinfín que es accionado de forma manual mediante una manivela. Por cada revolución el carro se desplazará verticalmente 1,27 mm. También cuenta con una célula de carga que es capaz de medir fuerzas de hasta 1kN y se encuentra conectada a un ordenador a través de una tarjeta de adquisición de datos. Los valores de carga aplicada son medidos mediante el software Labview que posteriormente los exporta a un fichero Excel para su tratamiento. En este caso al ser ensayos a flexión, el Labview mide tanto la fuerza aplicada en (N) como el desplazamiento en (mm). [26] [27]

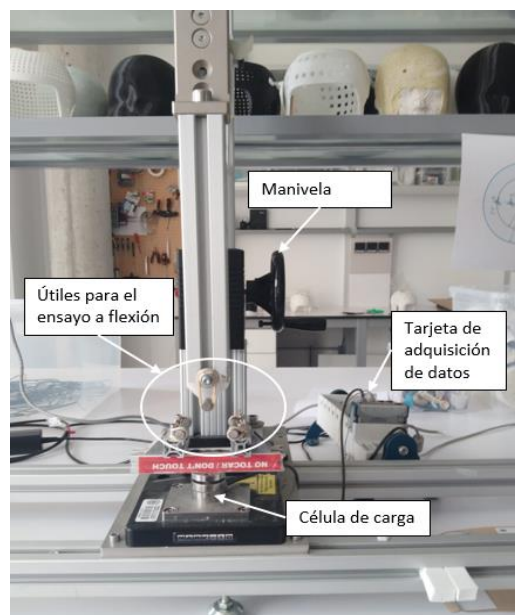


Figura 75. Máquina de ensayos Mark-10 ES30 con útiles para flexión Fuente Propia

En este caso las probetas van a ser ensayadas a flexión utilizando la norma UNE-EN ISO 178. Este método se usa para estudiar el comportamiento en flexión de las probetas, así como para la determinación de la resistencia a flexión, módulo de flexión, así como otros aspectos de la relación esfuerzo/deformación en flexión. Para realizar el ensayo se coloca la probeta apoyándola horizontalmente entre 2 apoyos y se aplica una carga en su punto medio.

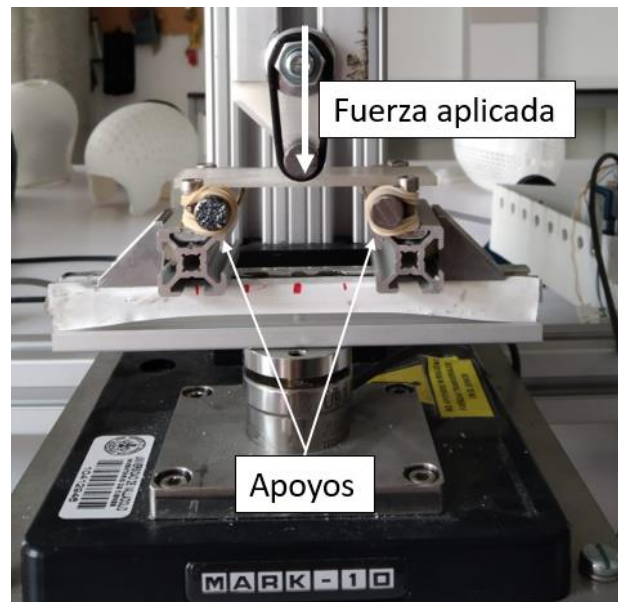


Figura 76. Esquema del ensayo a flexión Fuente Propia

Tal y como se ha dicho se aplica la carga a la probeta y en el Labview obtenemos los valores de fuerza frente al desplazamiento.



Figura 78. Realización de uno de los ensayos a flexión Fuente Propia

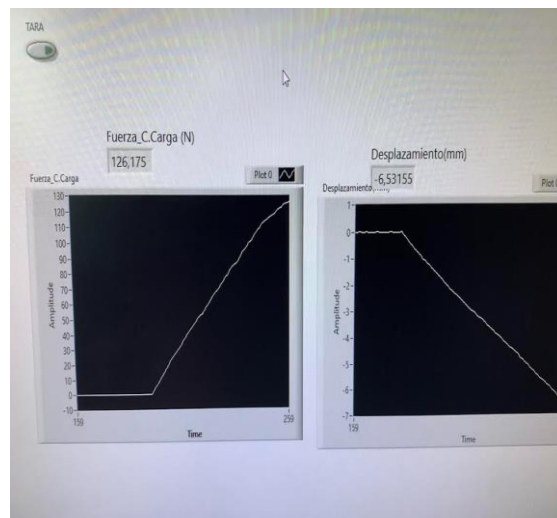


Figura 77. Gráficas de fuerza y desplazamiento obtenidas en Labview durante uno de los ensayos. Fuente Propia



Una vez finalizado el ensayo se genera un archivo Excel con los valores medidos de fuerza y desplazamiento. Con estos valores se pueden calcular los siguientes parámetros:

- Esfuerzo de flexión ( $\sigma_f$ ): esfuerzo nominal de la superficie externa de la probeta en el punto de aplicación de la carga. Se calcula con la siguiente ecuación:

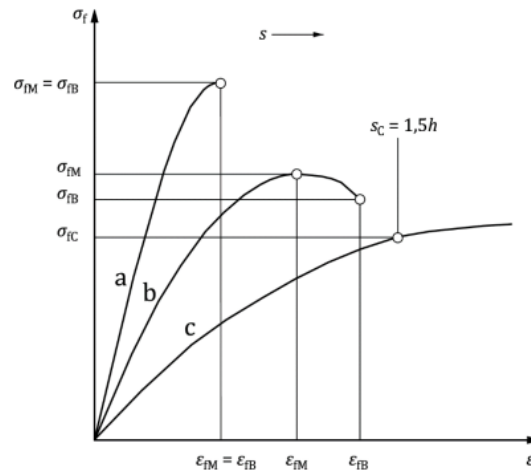
$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad [2]$$

Dónde: F es la fuerza aplicada (N), L es la distancia entre apoyos (mm), b es la anchura de la probeta (mm) y h es el espesor de la probeta (mm).

- Deformación en flexión ( $\varepsilon_f$ ): variación fraccional nominal en la longitud de un elemento de la superficie exterior de la probeta en el punto de aplicación de la carga. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_f = \frac{600sh}{L^2} \% \quad [3]$$

Dónde: s es la flecha (mm), h el espesor de la probeta (mm) y L la distancia entre apoyos (mm).



- Leyenda
- curva a    Probeta que rompe antes de la fluencia.
  - curva b    Probeta que muestra un máximo y rompe antes de la flecha convencional  $s_c$ .
  - curva c    Probeta que no muestra un máximo ni rompe antes de la flecha convencional  $s_c$ .

Figura 79. Curvas típicas de esfuerzo de flexión ( $\sigma_f$ ) frente a la deformación ( $\varepsilon_f$ ) y flecha s  
Fuente [25]

- Módulo de elasticidad en flexión ( $E_f$ ): Relación entre la diferencia de esfuerzos  $\sigma_{f2} - \sigma_{f1}$  y la correspondiente diferencia de deformaciones  $\epsilon_{f2} (=0,0025) - \epsilon_{f1} (=0,0005)$ . Equivale a la tangente en cada punto de la zona elástica en la gráfica de tensión-deformación ( $\sigma - \epsilon$ ).

### 4.3. Análisis de filamento PLA (3devo)

Los 3 experimentos que se han realizado con el PLA de 3devo se muestran a continuación:

Tabla 17. Experimentos realizados con PLA (3devo)

	Diámetro (mm)	H4 (°C)	H3 (°C)	H2 (°C)	H1 (°C)	Velocidad sinfín (rpm)	Velocidad ventilación (%)
1	1,75	170	185	190	170	3,5	80
2	1,75	170	185	190	170	5	80
3	2,85	170	185	190	180	5	70

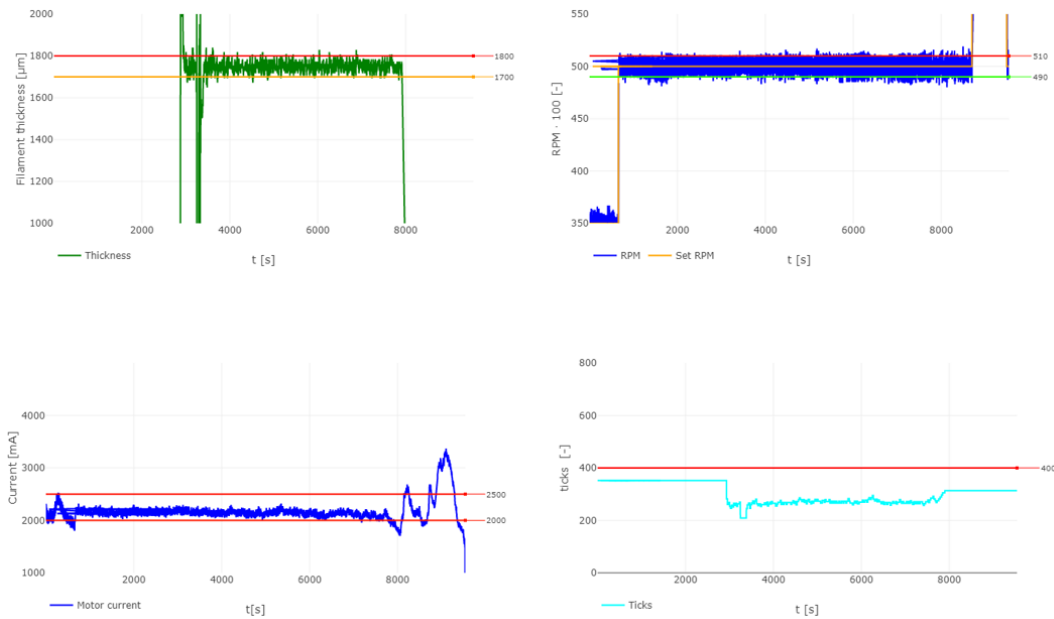


Figura 80. Gráficas del diámetro de filamento, velocidad del husillo, corriente del motor y velocidad el extractor (PLA 3devo 1,75mm Exp.2) Fuente Propia

El experimento 2 se corresponde con el control de calidad realizado después de proceder con la limpieza del husillo y del barril. En este experimento se tuvo que aumentar la velocidad del sinfín ya que utilizando la misma que para el experimento 1 el flujo era demasiado lento. Aun así, se puede observar que el diámetro del filamento se mantiene entre los valores establecidos ( $1,75\text{mm} \pm 50 \mu\text{m}$ ).

También se puede observar que en el experimento 2 tanto la corriente del motor como la velocidad del husillo no son tan constantes como antes de que se produjese el accidente, esto probablemente sea debido a que todavía quede algún resto de contaminación dentro del barril.

A continuación, se muestran unas imágenes medidas con el calibre del diámetro de filamento para cada experimento.



Figura 81. Diámetro medido con calibre (Experimento 1 (izda), Experimento 2 (centro), Experimento 3 (dcha.)) (PLA 3devo) Fuente Propia

Según se puede observar en la Figura 81, el diámetro del filamento para los 2 primeros experimentos no es  $1,75\text{mm}$ , sino que varía dentro del rango de  $\pm 50 \mu\text{m}$ , incluso hay picos que se salen de estos valores probablemente debido a que al enfriarse la bobina se produzca algo de contracción en el plástico.

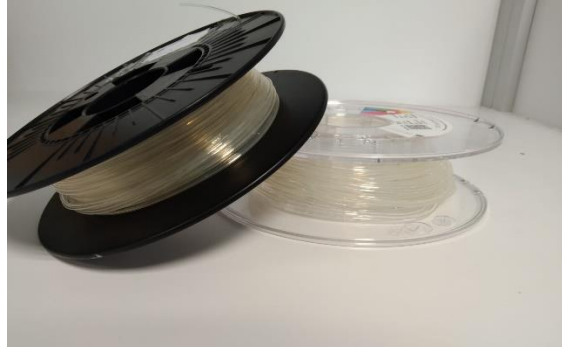


Figura 82. Bobinas de PLA (3devo) obtenidas con la filamentadora (Fuente Propia)

- **Impresión 3D de las bobinas**

Sin embargo, esto no es un problema ya que a la hora de imprimir con las bobinas obtenidas se han realizado impresiones de hasta 7 horas obteniendo diferentes prototipos como por ejemplo varias piezas de algunos compañeros del laboratorio que posteriormente usarán en sus respectivos TFGs.



Figura 83. Pieza realizada mediante Impresión 3D con PLA (Experimento 1) (Fuente Propia)

Una excepción a la hora de imprimir ha sido la bobina de 2,85 mm que ha tenido que ser impresa en la impresora Tumaker NX Pro Dual y de la cual no ha sido posible obtener una pieza o probeta ya que se atascaba continuamente, por lo que se decidió descartarla. Esto probablemente sea debido a que en el proceso de bobinado el filamento se pegase demasiado provocando una deformación curva en el filamento.

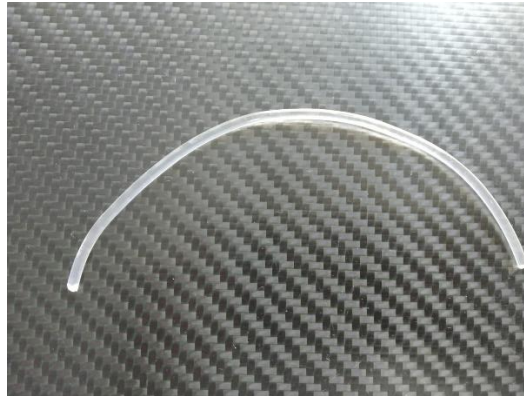


Figura 84. Filamento de PLA (2,85mm) con deformaciones curvas Fuente Propia

- **Ensayos de las probetas**

En cuanto a los ensayos a flexión realizados, dado que de la bobina de 2,85 no se pudo obtener bobinas, solamente se realizaron los ensayos a flexión a las probetas fabricadas con las bobinas de los experimentos 1 y 2. En estos ensayos todas las bobinas llegaron a romper.

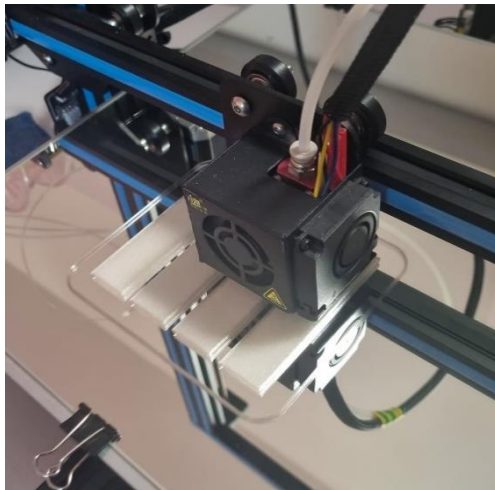


Figura 85. Impresión 3D de probetas con la  
Creality CR-10 Fuente Propia



Figura 86. Probeta de PLA antes  
(izda) y después (dcha.) del ensayo  
a flexión. Fuente Propia

Los resultados obtenidos del módulo de flexión ( $E$ ), esfuerzo de flexión máximo ( $\sigma_{f\text{máx}}$ ) y deformación en flexión máxima ( $\epsilon_{f\text{máx}}$ ) así como las gráficas de Fuerza-Desplazamiento y Esfuerzo-Deformación se pueden ver a continuación.

Tabla 18. Módulo de flexión, esfuerzo de flexión máximo y deformación en flexión máxima (Exp 1 y 2 PLA 3devo)

Experimento	E (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\epsilon_{max}$ (%)
1	2024,00	66,37	4,31
2	1901,91	61,87	4,27

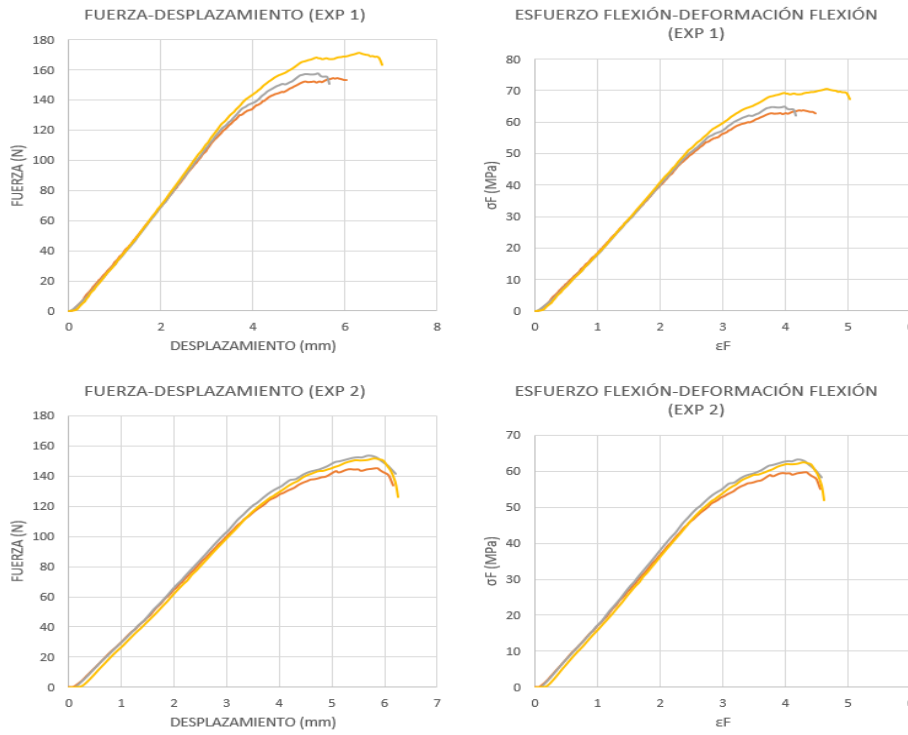


Figura 87. Gráficas Fuerza-Desplazamiento y Esfuerzo-Deformación (Exp 1 y 2 PLA 3devo) Fuente Propia

Tal y como se puede observar los parámetros obtenidos para el ensayo de flexión son mayores para la bobina de PLA obtenida en el experimento 1. Esto puede ser debido a que la calidad del filamento 1 sea mejor que la del filamento 2 por varias razones:

- La velocidad de extrusión de la primera bobina (3,5 rpm) sea más adecuada que la de la segunda (5 rpm) consiguiendo así una mejor mezcla del material y por tanto mejor calidad.
- La contaminación que queda en el interior del barrel no está permitiendo que el proceso de mezcla en el experimento 2 se lleve a cabo de forma óptima disminuyendo la calidad del filamento.

Gracias a estos experimentos se observa que la contaminación del equipo debido a la degradación del plástico afecta a la calidad final del filamento obtenido.

#### 4.4. Análisis de filamento de PLA (Smartmaterials 3D)

En este caso tal y como se comentó en el apartado 3.5.5, los experimentos que se han realizado con este PLA han sido los siguientes:

Tabla 19. Experimentos PLA (SmartMaterials 3D)

Experimento	Diámetro (mm)	H4 (°C)	H3 (°C)	H2 (°C)	H1 (°C)	Velocidad sinfín (rpm)	Velocidad ventilación (%)
1	1,75	170	185	190	170	4,5	70
2	1,75	170	190	195	175	4,5	70
3	1,75	170	180	185	170	4,5	70
4	1,75	170	185	190	170	3,5	70
5	1,75	170	185	190	170	3,5	70
6	1,75	170	185	190	170	3,5	80

Los primeros experimentos se realizaron para comprobar cómo afectaban los cambios de Temperatura de la zona de mezcla del material (H2 y H3). Para ello se realizaron 3 experimentos, el primero de ellos con los parámetros de temperatura utilizados para el PLA de 3devo y los otros dos aumentando en 5 °C la temperatura de esas dos zonas (Exp. 2) y disminuyéndola 5 °C (Exp. 3)

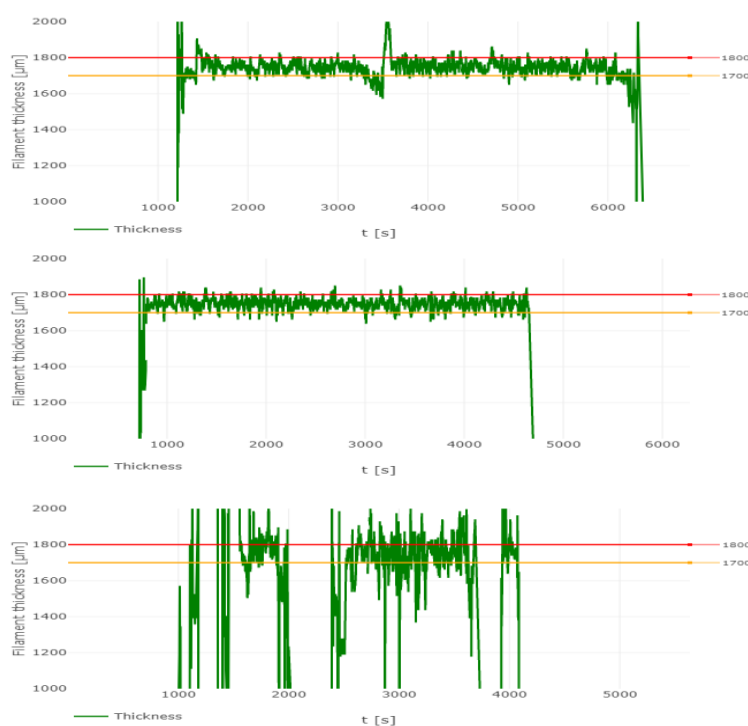


Figura 88. Gráficas de los diámetros de las bobinas obtenidas en los Experimentos 1,2 y 3 (PLA SmartMaterials 3D) Fuente Propia

Tal y como se puede observar en las gráficas, en este caso el aumento de temperatura no ha influido apenas en el diámetro del filamento ya que en ambos casos se mantienen dentro de los parámetros establecidos ( $1,75\text{mm} \pm 50\mu\text{m}$ ). En el experimento 1 sin embargo, se puede observar que a la mitad del bobinado hay una alteración en el diámetro del filamento. Esto se puede deber a que justo en ese momento el filamento no salió bien mezclado por la boquilla lo que hizo que la lectura del sensor en ese momento formase el pico. En una futura impresión podría darse el caso de que al llegar a ese punto la bobina se quedase atascada en el extractor o en el sistema de guiado de la impresora, estropeando el proceso de fabricación de una posible pieza.

\*Nota: Las gráficas de todos los experimentos realizados (diámetro, velocidad sinfín, corriente del motor y velocidad del extractor) se pueden encontrar en los Anexos.



Figura 89. Diámetro medido con calibre  
(Experimento 1 (izda), Experimento 2 (dcha.)) (PLA  
SmartMaterials 3D) Fuente Propia

En el caso de la disminución de temperatura sí que se observa que afecta al diámetro del filamento ya que se vió que no se producía una buena mezcla en el interior de la extrusora por lo que la calidad del filamento obtenido no era buena y finalmente no se procedió al bobinado en este experimento (Exp. 3).



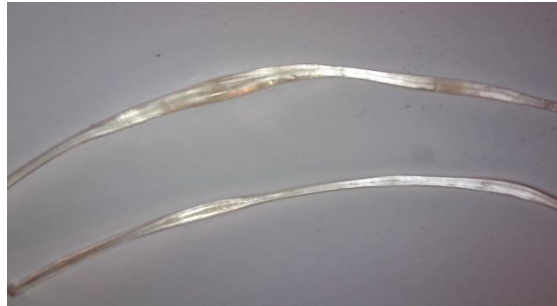


Figura 90. Ejemplo de filamento de mala calidad debido a una mala mezcla del material en la extrusora (Exp. 3) Fuente Propia

- **Impresión 3D de las bobinas**

A la hora de probar las bobinas obtenidas para su impresión en 3D se llevó a cabo la fabricación de diferentes útiles que van a ser utilizados en el laboratorio tales como palas para introducir los pellets en la tolva y parte del prototipo usado para convertir el flujo de aire de la filamentadora de unidireccional a axial (Ver apartado 3.5.6).

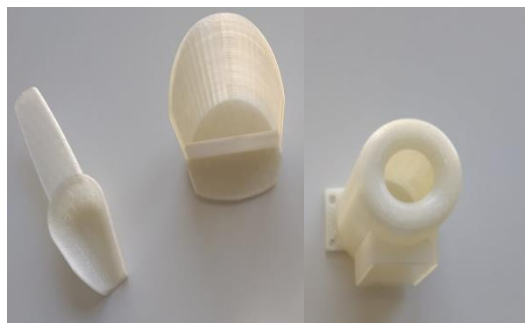


Figura 91. Útiles fabricados mediante impresión 3D con las bobinas 1 y 2 Fuente Propia

- **Ensayos de las probetas**

En cuanto a la impresión de probetas para los ensayos a flexión solamente se hicieron de los experimentos 1 y 2 ya que como se ha comentado del experimento 3 no se llegó ni siquiera a fabricar una bobina. Los resultados obtenidos se pueden ver a continuación:

Tabla 20. Módulo de flexión, esfuerzo de flexión máximo y deformación en flexión máxima (Exp 1 y 2 PLA SmartMaterials 3D)

Experimento	E (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\epsilon_{max}$ (%)
1	2142,88	73,46	4,18
1 (bobina seca)	2401,24	77,94	4,46
2	2361,79	78,74	4,50

\*Nota: Las gráficas de Fuerza-Desplazamiento y Esfuerzo-Deformación se pueden encontrar en los Anexos.

En este caso se quiso comprobar el efecto que tendría someter a la bobina a un proceso de secado previo a la impresión de las probetas. Para ello se utilizó una secadora de filamento Smart3D que elimina la humedad de las bobinas mediante temperatura y vacío. Para este caso se dejó secar la bobina durante 3 horas a una temperatura de 60 °C.



Figura 92. Secadora de filamento para impresión 3D modelo SMART3D Fuente Propia

Tal y como se puede observar se nota una mejora en las propiedades de las probetas hechas con la bobina seca, de lo que se puede extraer que la humedad tal y como se ha dicho anteriormente en el apartado 3.3 puede afectar negativamente a la impresión 3D y por consiguiente a las propiedades de las piezas impresas y también se concluye que es necesario mantener las bobinas en una bolsa herméticamente cerrada para evitar que puedan absorber humedad.

En cuanto a la comparación de los ensayos 1 y 2 se ve que las propiedades obtenidas en los ensayos a flexión realizados son mejores en el segundo experimento, por ejemplo, el módulo de flexión es un 12% mayor con la bobina seca que sin secar, por lo que se puede decir que el aumento de las temperaturas de la zona de mezcla (H2 y H3) han mejorado la calidad del filamento obtenido.

Con respecto a los experimentos 4, 5 y 6 las temperaturas utilizadas han sido las mismas que para el experimento 1 y lo que se ha cambiado ha sido la velocidad del sinfín que se ha reducido a 3,5 rpm en los 3 y además entre los experimentos 4-5 y el 6 se ha aumentado la velocidad de los ventiladores para ver así la influencia que tiene sobre la calidad del filamento y posterior impresión (del 70% al 80%).

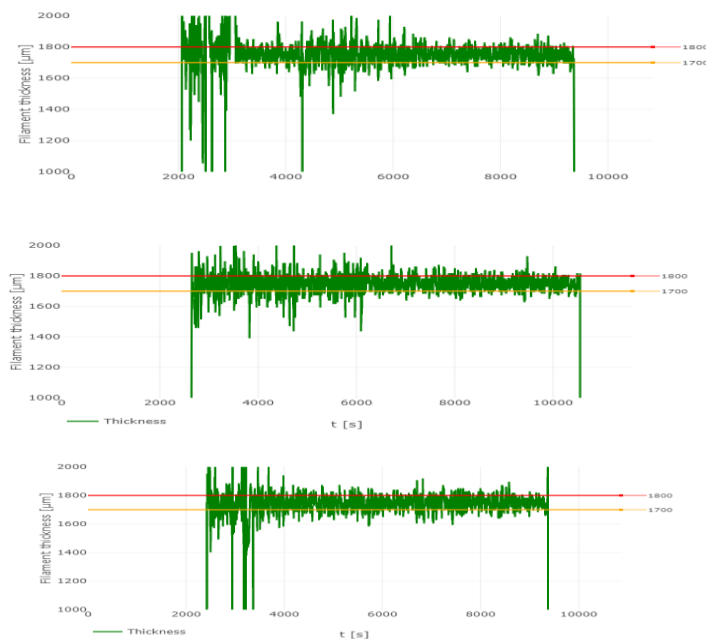


Figura 93. Gráficas de los diámetros de las bobinas obtenidas en los Experimentos 4,5 y 6 (PLA SmartMaterials 3D) Fuente Propia

tal y como se puede observar en las gráficas, el diámetro del filamento para las 3 bobinas no se mantiene tan estable ( $1,75\text{mm} \pm 50\mu\text{m}$ ) como en los anteriores experimentos (1,2 y 3). Esto puede ser debido a la disminución de la velocidad del tornillo sinfín ya que es el único parámetro que se ha cambiado, por lo que en este caso una disminución de la velocidad del husillo repercute negativamente en la calidad del filamento.

Respecto a los experimentos 5 y 6 se puede observar que al aumentar la intensidad de los ventiladores (del 70% al 80%) se ha notado una mejora en la estabilidad del diámetro del filamento y por tanto se ve una mejora en la calidad del mismo.



Figura 94. Diámetro medido con calibre (Experimento 4 (izda), Experimento 5 (centro), Experimento 6 (dcha.)) (PLA SmartMaterials 3D) Fuente Propia

En la figura anterior se puede comprobar que realmente el diámetro de las bobinas obtenidas en los experimentos 4, 5 y 6 no se mantiene tan estable y se sale de los valores normales ( $1,75\text{mm} \pm 50\mu\text{m}$ ), por ejemplo, se ve que en algunos casos el diámetro es de 1,66-1,68 mm.

\*Nota: Las gráficas de todos los experimentos realizados (diámetro, velocidad sinfín, corriente del motor y velocidad del extractor) se pueden encontrar en los Anexos.



Figura 95. Bobinas de PLA (SmartMaterials 3D) obtenidas con la filamentadora. Fuente Propia

- **Impresión 3D de las bobinas**

A la hora de probar las bobinas obtenidas para su impresión en 3D se llevó a cabo la fabricación de algunos prototipos que se utilizarán en diferentes prototipos que formarán parte del TFG de algunos compañeros de laboratorio.

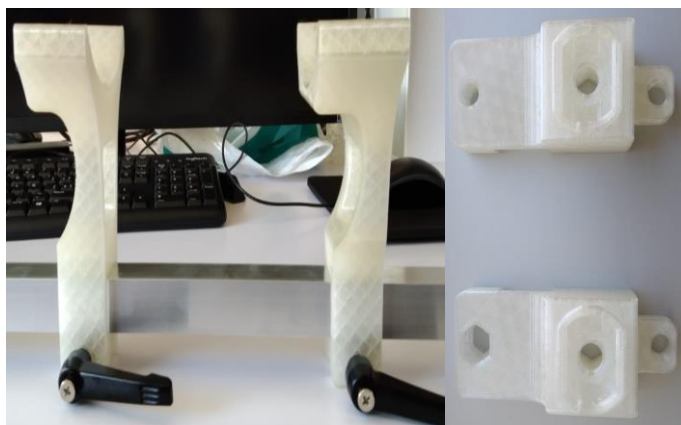


Figura 96. Piezas realizadas mediante Impresión 3D con las bobinas de los experimentos 5 y 6. Fuente Propia

En este caso a la hora de realizar las probetas, se tuvo que repetir la impresión de las mismas en el caso de los experimentos 5 y 6 ya que en ambos casos se tuvo problemas de adherencia entre capas debido probablemente a la inestabilidad del diámetro de las bobinas que puede provocar el fenómeno denominado “subextrusión”, durante el cual el filamento no es lo suficientemente grueso y las ruedas extractoras no arrastran el filamento adecuadamente haciendo que no haya suficiente material dentro del fusor provocando así que no salga material por la boquilla de la impresora.

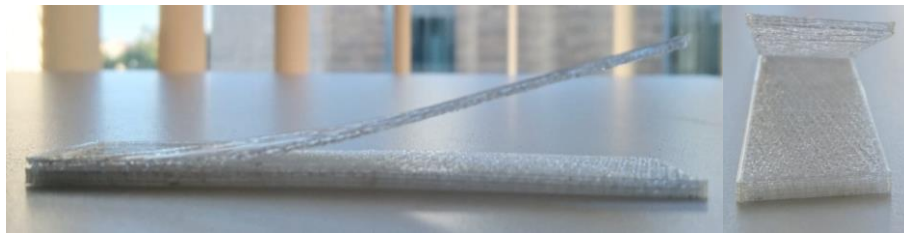


Figura 97. Probeta de PLA mal impresa (Subextrusión) Fuente Propia

- **Ensayos de las probetas**

Finalmente, después de este problema encontrado se logró imprimir las probetas de las 3 bobinas y se realizaron los ensayos de flexión.

Tabla 21. Módulo de flexión, esfuerzo de flexión máximo y deformación en flexión máxima (Exp 4,5 y 6 PLA SmartMaterials 3D)

Experimento	E (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\epsilon_{max}$ (%)
4	2117,41	68,47	4,28
5	2107,52	68,12	3,95
6	2227,76	73,22	3,80

\*Nota: Las gráficas de Fuerza-Desplazamiento y Esfuerzo-Deformación se pueden encontrar en los Anexos.

Según se puede observar en la tabla 20, los experimentos 4 y 5 se han llevado a cabo utilizando los mismos parámetros para poder observar la repetibilidad del ensayo se ha visto que no se ha llevado a cabo este fenómeno, ya que influyen diferentes parámetros como la propia extrusión, la impresión 3D y también la forma de realizar los diferentes ensayos, pero se ve que tienen valores muy similares (diferencia en E y  $\sigma$  menores del 1%).

Comparando los experimentos 5 y 6 se ve que al aumentar la intensidad de los ventiladores se mejoran los valores del módulo de flexión y del esfuerzo de flexión máximo.

Otra cosa que se puede observar es que durante la realización de todos los experimentos la corriente del motor sigue estando por debajo de los valores normales de operación (2000-2500 mA) y se mantiene por debajo de 2000 mA, con picos en algunos momentos debido a los picos que se producen en la velocidad del motor. Esto probablemente sea debido a que siguen quedando restos de contaminación dentro del barril que no han podido eliminarse pese a las continuas operaciones de limpieza que se han realizado, por lo que la calidad del filamento no va a ser del todo buena, pese a obtener resultados prometedores ya que el calor generado por la fricción del tornillo sinfín no se está produciendo de forma óptima disminuyendo la calidad de fusión/mezcla del polímero dentro de la extrusora y consiguiente disminución en la calidad y las propiedades del filamento obtenido.

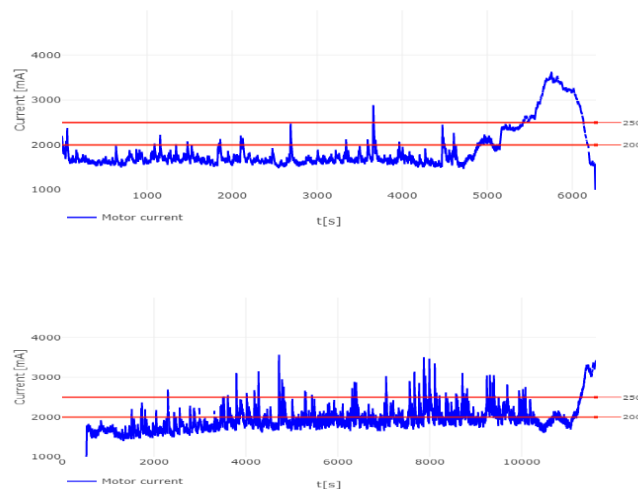


Figura 98. Corriente del motor de los experimentos 2 y 6 (PLA SmartMaterials 3D) Fuente Propia

Teniendo en cuenta esto último, las conclusiones que se pueden sacar de estos experimentos son:

- El secado de las bobinas mejora la impresión, así como las propiedades de las piezas obtenidas.
- Disminuir la velocidad del sinfín por debajo de 4,5 rpm empeora la calidad del filamento.
- Un aumento en la intensidad del sistema de enfriamiento mejora la calidad del filamento.

#### 4.5. Análisis de filamento de PLA comercial

En este apartado se van a ver los valores obtenidos al realizar el ensayo de flexión sobre las probetas impresas utilizando una bobina de filamento de PLA comercial.



Figura 99. Bobina de PLA comercial utilizada Fuente [23]

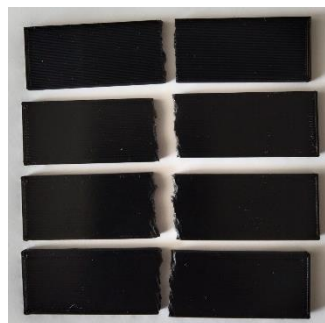


Figura 100. Probetas de PLA comercial ensayadas Fuente Propia

Tabla 22. Módulo de flexión, esfuerzo de flexión máximo y deformación en flexión máxima (PLA comercial VS Bobinas de PLA propias (Smartmaterials 3D))

Experimento	E (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\epsilon_{max}$ (%)
Comercial	2826,75	94,80	4,62
Smart 1	2142,88	73,46	4,18
Smart 1 (Seca)	2401,24	77,94	4,46
Smart 2	2361,79	78,74	4,50
Smart 4	2117,41	68,47	4,28
Smart 5	2107,52	68,12	3,95
Smart 6	2227,76	73,22	3,80

Se puede observar que el filamento de PLA comercial posee una mejor calidad que el filamento de PLA obtenido con la filamentadora. EL filamento que más se acerca es el que se corresponde con el experimento 1 después de someter la bobina al proceso de secado.

Una de las causas de esta diferencia entre el filamento de PLA realizado en el laboratorio y el PLA comercial es, como se ha dicho en ocasiones anteriores, debido a la posible contaminación interna del equipo de extrusión que se ha utilizado para fabricar las bobinas.

\*Nota: Las gráficas de Fuerza-Desplazamiento y Esfuerzo-Deformación se pueden encontrar en los Anexos.

#### 4.6. Análisis de filamento de PP

En este apartado se va a realizar el análisis de las diferentes bobinas de PP obtenidas a partir de los siguientes experimentos:

Tabla 23. Experimentos PLA (SmartMaterials 3D)

Experimento	H4 (°C)	H3 (°C)	H2 (°C)	H1 (°C)	Velocidad sinfín (rpm)	Velocidad ventilación (%)
1	170	170	170	170	5	50
2	170	175	175	170	5	80
3	170	175	175	170	5	90
4	170	175	175	170	4,5	90

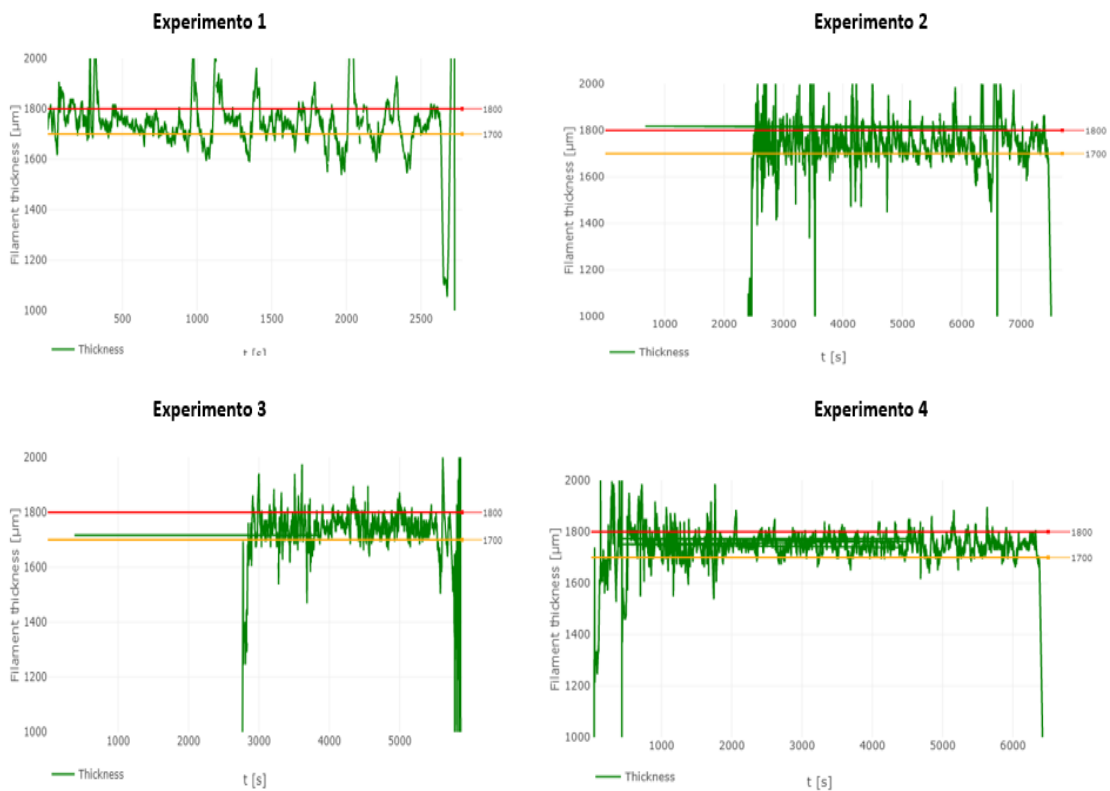


Figura 101. Gráficas de los diámetros de las bobinas obtenidas en los Experimentos 4,5 y 6 (PLA SmartTMaterials 3D) Fuente Propia



El primer experimento se realizó justo después de llevar a cabo el ajuste de las temperaturas a las cuales el flujo de PP era más estable, ver 3.5.6 al igual que el valor de la velocidad (5 rpm). Sin embargo, se observó que con un 50% de ventilación el diámetro del filamento no era lo suficientemente estable y variaba bastante, por lo que se optó por subir este valor hasta el 80% del experimento 2. A su vez también se subieron 5°C las temperaturas de los calentadores de la zona de mezcla (H2 y H3), lo que conllevó a obtener un diámetro más estable. Para el siguiente experimento, se optó por subir otro poco la intensidad de los ventiladores (hasta el 90%) logrando estabilizar aún más el diámetro, acercándolo más hacia el objetivo (1,75mm±50µm). Después de realizar este experimento se intentó subir al 100% los ventiladores, pero se observó que desestabilizaba bastante el flujo del filamento a su paso por el sistema de ventilación (el filamento temblaba mucho) por lo que se dejó al 90%. Finalmente, en el último experimento, se probó a bajar la velocidad del sinfín hasta 4,5 rpm lo que hizo que la estabilidad del filamento mejorase con respecto al experimento 3, manteniéndose casi todo el rato dentro del objetivo (1,75mm±50µm) aunque se puede observar algún pico que se sale de estos valores.

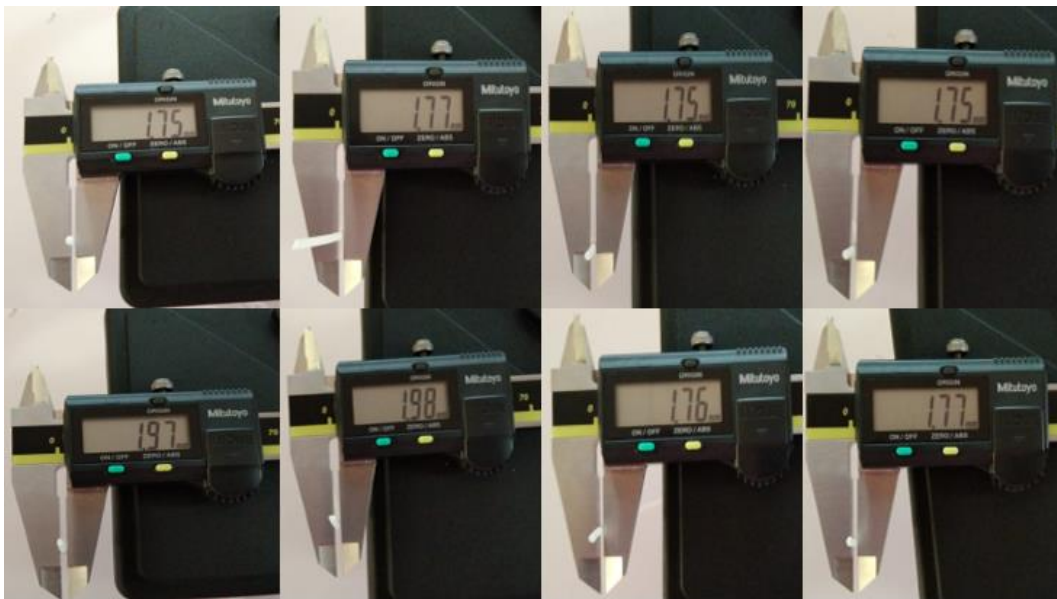


Figura 102. Diámetro medido con calibre (Experimento 1 (izda), Experimentos 2 y 3 (centro), Experimento 4 (dcha.)) (PP) Fuente Propia

\*Nota: Las gráficas de todos los experimentos realizados (diámetro, velocidad sinfín, corriente del motor y velocidad del extractor) se pueden encontrar en los Anexos.

En las mediciones que se observan en la figura anterior se pone de manifiesto el hecho de la variación de diámetro que se ha comentado en el anterior párrafo. Esto es debido a que en realidad en los dos primeros experimentos el filamento no era del todo redondo, sino que estaba algo ovalado por eso tanta diferencia del diámetro ya que se ha medido en las dos direcciones.



Figura 103. Bobinas de PP obtenidas con la filamentadora Fuente Propia

- **Ensayos de las probetas**

En cuanto a la impresión 3D de las probetas, se encontraron los problemas típicos a la hora de imprimir el Polipropileno (contracción o “warping”, problemas de adherencia) además de que una de las bobinas se atascó en el sistema de guiado del filamento. Para intentar evitar el problema de adherencia se utilizó un pegamento especial que hiciese que el polipropileno se mantuviese pegado a la cama de impresión en todo momento.

Debido a esto solamente se logró obtener una tanda de probetas, las correspondientes con el experimento 2. En caso de haber dispuesto de más tiempo y recursos disponibles (disponibilidad de poder usar la Impresora Tumaker NX Pro Dual) se habría podido intentar imprimir más probetas para poder analizarlas.

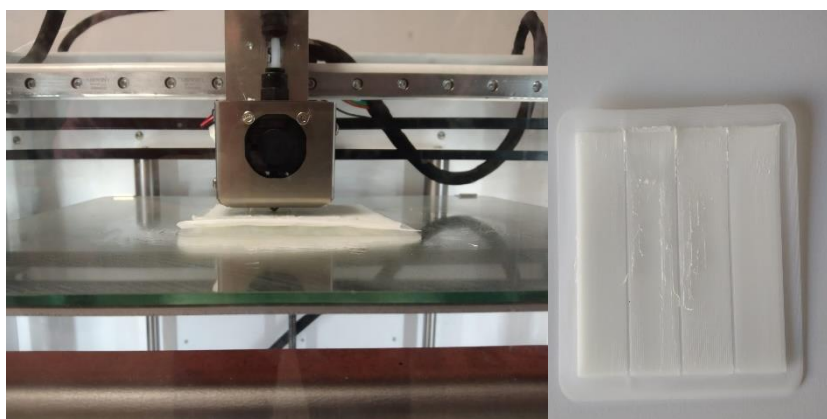


Figura 104. Problemas de adherencia y “warping” encontrados durante la impresión del PP Fuente Propia

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al realizar los ensayos a las probetas de polipropileno:

Tabla 24. Módulo de flexión, esfuerzo de flexión máximo y deformación en flexión máxima (PP)

Experimento	E (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\epsilon_{max}$ (%)
2	953,74	33,86	7,10

\*Nota: Las gráficas de Fuerza-Desplazamiento y Esfuerzo-Deformación se pueden encontrar en los Anexos.

En este caso se ve que las probetas de PP no rompen, sino que llega un momento en el que se deforman irreversiblemente superando el límite elástico (deformación plástica).

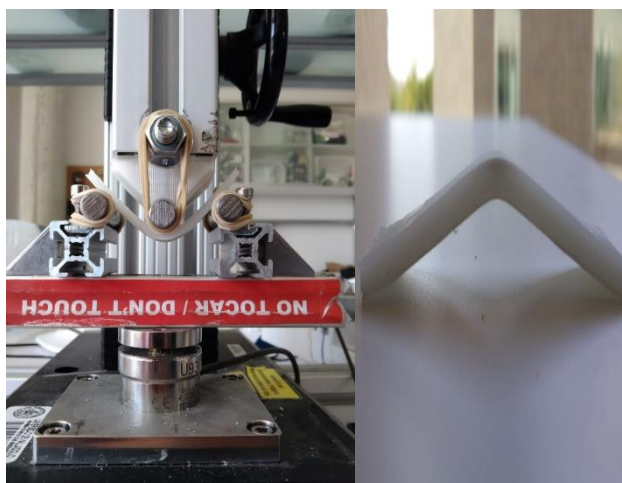


Figura 105. Probeta de PP durante el ensayo (izda.) y después del ensayo (dcha.) Fuente Propia

Para poder analizar el valor del módulo de flexión obtenido en estos ensayos, se ha buscado el valor de dicho módulo para dos polipropilenos comerciales (Recreus y Fiberlogy) en las correspondientes fichas técnicas de los productos.

Tabla 25. Módulo de flexión del PP obtenido y de 2 polipropilenos comerciales

Material	E (MPa)	Método
PP propio	953,74	ISO178
PP Recreus	800	ISO178
PP Fiberlogy	1200	ISO178

En este caso se ve que el valor del módulo obtenido está entre los 2 valores de los polipropilenos comerciales por lo que se puede decir que la bobina de filamento obtenida se podría asemejar a una bobina de PP comercial.

En resumen, de estos experimentos realizados con PP se extrae que los mejores parámetros encontrados han sido:

Tabla 26. Mejores parámetros utilizados para fabricar filamento de PP

H4 (°C)	H3 (°C)	H2 (°C)	H1 (°C)	Velocidad sinfín (rpm)	Velocidad ventilación (%)
170	175	175	170	4,5	90

Sin embargo, se vuelve a observar en las gráficas obtenidas durante los experimentos realizados que la corriente del motor está en niveles bajos (1500 mA) lo que vuelve a poner de manifiesto la contaminación en el interior del barril lo que hace que el proceso de extrusión no se lleve a cabo de forma óptima.

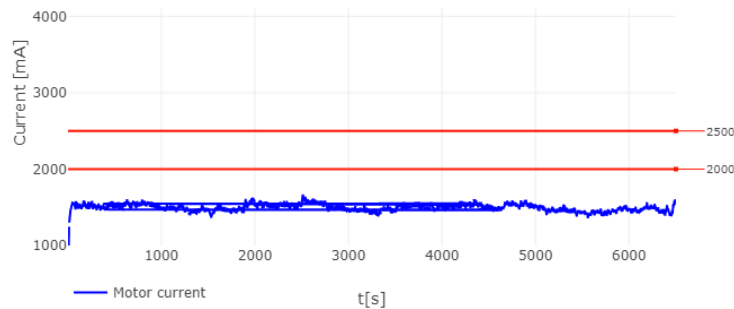


Figura 106. Corriente del motor del Experimento 4 (Fuente propia)

Aunque se hayan encontrado unos parámetros adecuados para obtener una bobina de PP, hay que tener en cuenta el hecho de que la filamentadora se encuentra algo contaminada por lo que no trabaja de forma correcta. Se debería de corregir este problema para dejar la extrusora a punto y después seguir investigando este material hasta poder encontrar los parámetros óptimos que permitan obtener una bobina que se ajuste a los estándares de calidad requerida, para así poder fabricar no solamente probetas para su ensayo sino piezas funcionales.



## Capítulo V: Conclusiones y líneas futuras



## 5.1. Conclusiones Finales

Al principio del trabajo el objetivo principal del proyecto era la obtención de filamento plástico para impresión 3D de calidad, utilizando un equipo de extrusión de bajo coste (Filament Maker Precision 350), pero durante uno de los primeros experimentos que se estaban llevando a cabo la máquina sufrió un accidente provocado por la degradación de plástico en el interior del barril, tal y como se ha explicado en el apartado 3.5.4, y a pesar de los intentos de limpieza llevados a cabo, no se ha logrado que la filamentadora utilizada pudiese volver a su funcionamiento inicial. En los sucesivos experimentos que se realizaron después de este incidente se observó que todavía quedaba contaminación dentro de la extrusora que hacía que la calidad del filamento disminuyese debido a que la generación de calor viscoso que es una parte muy importante en el proceso de extrusión de los plásticos, no fuese lo suficientemente buena, provocando que el material dentro del sistema no se mezclase de forma correcta obteniendo un filamento de menor calidad al esperado.

A pesar de no haber logrado el objetivo principal que se marcó en un primer momento, los filamentos de PLA obtenidos han permitido realizar impresiones largas (de hasta 8 horas) en las que se han fabricado prototipos utilizados por algunos compañeros para realizar sus respectivos trabajos fin de grado. No ha sido así con el filamento de PP que a pesar de haber fabricado diferentes bobinas que han resultado mantenerse dentro de unos parámetros de calidad más que aceptables solamente ha sido posible imprimir apenas 4 probetas con ellas debido a los problemas de impresión que presenta este material (contracción o “warping” y problemas de adherencia con la cama de impresión y entre capas).

Además, al haber tenido que enfrentar un problema como el que se ha puesto de manifiesto ha servido para entender mucho mejor el proceso de extrusión de los plásticos además de para conocer mucho mejor todas las partes de las que se compone una extrusora de estas características. Por otro lado, se ha comprobado de esta forma que hay que tener mucho cuidado con los parámetros de operación que se usan para extruir cada plástico, ya que unas condiciones de operación inadecuadas pueden hacer que se produzcan este tipo de situaciones. Además, supuso todo un desafío tener que desmontar el equipo de extrusión y proceder a la limpieza del mismo.

A pesar de los inconvenientes que se han encontrado a lo largo del proyecto se ha logrado fabricar filamento de calidad aceptable, obteniendo resultados prometedores una vez realizados los diferentes análisis.

## 5.2. Líneas futuras

Las líneas futuras que se pueden seguir a partir de aquí son las siguientes:

- Lo primero de todo que habría que hacer sería eliminar todo rastro de contaminación que quede dentro del barril. Para ello debido a que desmontar el cilindro no es recomendable realizarlo por uno mismo, la solución más factible sería enviar la filamentadora de vuelta al fabricante para que ellos se encarguen de volver a poner el equipo de extrusión a punto.
- Una vez estuviese a punto de nuevo la filamentadora, el otro paso que se habría de dar sería fabricar filamento plástico para Impresión 3D a partir de plástico reciclado, para así poder cerrar de ese modo el ciclo de la economía circular.

Para ello se dispone de una trituradora de plástico que se ha adquirido recientemente (Molino de corte modelo SM300 de la empresa Retsch) en la que se pueden triturar las piezas defectuosas de las que se dispone en el laboratorio (probetas, órtesis, etc...).

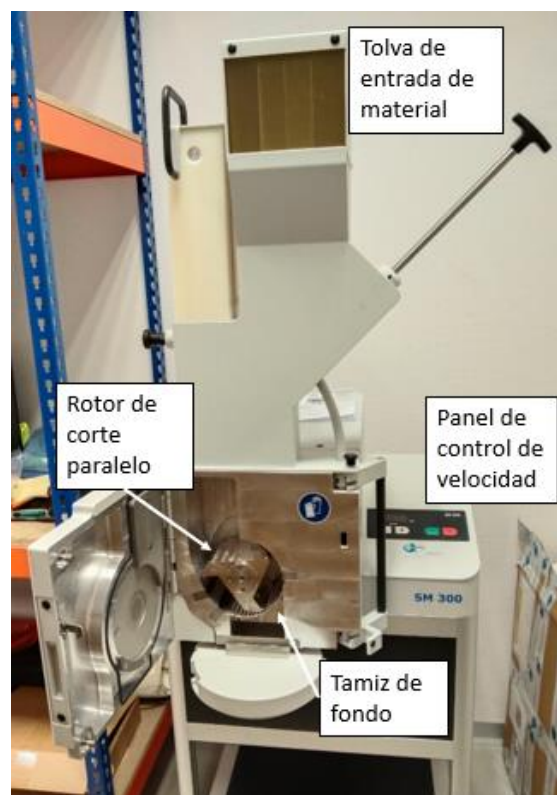


Figura 107. Molino de corte SM300 para la trituración de plásticos (Fuente Propia)

Se ha probado a triturar piezas defectuosas de PP que había en el laboratorio (probetas, órtesis) utilizando una velocidad de 1000 rpm y se ha obtenido un material triturado que tiene un buen tamaño para poderlo introducir en la filamentadora. Así que como línea futura se recomienda experimentar con este triturado de PP.



*Figura 108. Piezas de PP antes(izda.) y después (dcha.) de la trituración. Fuente Propia*





Universidad de Valladolid

Análisis de la obtención de filamento para  
impresión 3D utilizando una máquina  
extrusora de bajo coste



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

## CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFÍA



## Bibliografía

- [1] P. Europe, «La economía circular de los plásticos: Una visión Europea,» 2020.
- [2] A. (. d. d. d. I. c. Valenciana), «EnCircular,» [En línea]. Available: <https://encircular.es/en/recurso/circular-economy-material-flows-eurostat-european-commission-nov-2021/>. [Último acceso: 20 Junio 2022].
- [3] D. V. Rosato, D. V. Rosato y M. V. Rosato, «Extrusion,» *Plastic Product Material and Process Selection Handbook*, pp. 227-281, 2004.
- [4] R. W. J. John, E. M. Mount III y H. F. Giles Jr., *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*, Segunda ed., Elsevier, 2014.
- [5] C. Rauwendaal, *Understanding Extrusion*, 3ª ed., Munich: HANSER PUBLICATIONS, 2018.
- [6] © 2022 3devo B.V., «Support 3devo,» [En línea]. Available: <https://support.3devo.com/>. [Último acceso: 13 Junio 2022].
- [7] Filastruder, © 2022, «Filastruder,» [En línea]. Available: <https://www.filastruder.com/products/filastruder-kit?variant=323882043>. [Último acceso: 10 Abril 2022].
- [8] «Felfil,» [En línea]. Available: <https://felfil.com/es/felfil-evo/?v=5ea34fa833a1>. [Último acceso: 10 Abril 2022].
- [9] «ReDeTec,» [En línea]. Available: <https://redetec.com/>. [Último acceso: 10 Abril 2022].
- [10] © 2022, Filabot., «Filabot,» [En línea]. Available: <https://www.filabot.com/collections/ex6-extruder>. [Último acceso: 10 Abril 2022].
- [11] «Filafab,» [En línea]. Available: <http://d3dinnovations.com/filafab/product/filafab-ex-350/>. [Último acceso: 10 Abril 2022].



- [12] 2022, © Wellzoom, «Wellzoom,» [En línea]. Available: <http://wellzoomextruder.com/product/wellzoom-desktop-filament-extruder-b/>. [Último acceso: 10 Abril 2022].
- [13] «Noztek,» [En línea]. Available: <https://noztek.com/>. [Último acceso: 10 Abril 2022].
- [14] B. Redwood, F. Schoffer y B. Garret, The 3D printing handbook : technologies, design and applications, Amsterdam, 2018.
- [15] E. Valverde Lorenzo, «Análisis de la influencia de la temperatura de la cámara en piezas fabricadas por impresión 3D por la tecnología FFF,» 2018. Trabajo de Fin de Grado, Dir. Alberto Mansilla Gallo, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, Valladolid
- [16] © 3Dnatives 2022, «3Dnatives,» [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/ecologico-realmente-filamento-pla-230720192/#!>. [Último acceso: 10 Junio 2022 ].
- [17] «Wikipedia,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido\\_polil%C3%A1ctico](https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido_polil%C3%A1ctico). [Último acceso: Junio 2022].
- [18] © 3Dnatives 2022, «3Dnatives,» [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/caracteristicas-polipropileno-impresion-200720202/>. [Último acceso: Junio 2022].
- [19] L. Cornejo, «Nuevas tecnologías y materiales,» 2018. [En línea]. Available: <https://nuevatecnologiasymateriales.com/proceso-de-fabricacion-del-polipropileno-catalizadores/>. [Último acceso: Junio 2022].
- [20] Filament2Print ©, «filament2print,» [En línea]. Available: [https://filament2print.com/es/blog/49\\_petg.html](https://filament2print.com/es/blog/49_petg.html). [Último acceso: Junio 2022].
- [21] © Mexpolimeros, «Absorción de humedad».
- [22] © 2022 3devo B.V., «3devo,» [En línea]. Available: <https://www.3devo.com/>. [Último acceso: Marzo 2022].
- [23] © Smartmaterials 3D, «Smartmaterials 3D,» [En línea]. Available: <https://www.smartmaterials3d.com/>. [Último acceso: Mayo 2022].



- [24] © EDDM Training & EDDM Solutions, «Blog Ingenius EDDM,» [En línea]. Available: <https://eddm.es/blog-ingenius/design-for-additive-manufacturing-anisotropia-en-impresion-3d/>. [Último acceso: Mayo 2022].
- [25] UNE, «ISO 178: Plásticos Determinación de las propiedades de flexión,» 2019.
- [26] J. Benito Blanco, «Diseño y fabricación mediante impresión 3D de una prótesis de dedo con sensor de fuerza incorporado,» 2020. Trabajo de Fin de Grado, Dir. Alberto Mansilla Gallo, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, Valladolid
- [27] J. Valentín-Gamazo García, «Desarrollo de férulas mediante impresión 3D: comportamiento mecánico del material y prototipado».
- [28] Technologies, © 2022 Of3lia, «Of3lia,» [En línea]. Available: <https://of3lia.com/software-para-impresora-3d/>. [Último acceso: 20 Mayo 2022].



Universidad de Valladolid

Análisis de la obtención de filamento para  
impresión 3D utilizando una máquina  
extrusora de bajo coste



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

## CAPÍTULO VII: ANEXOS

Tabla 27. Tabla comparativa entre Filamentadora 3Devo y filamentadoras nivel Principiante.

COMPAÑÍA	3DEVO	FILASTRUDER	FELFIL	REDETEC
<b>MODELO</b>	<b>Precision 350</b>	<b>Filastruder kit</b>	<b>Felfil EVO</b>	<b>ProtoCycler +</b>
<b>TEMPERATURA MÁXIMA DE EXTRUSIÓN</b>	350 °C	200-400 (260)°C	200-400 (250)°C	200-400 (260)°C
<b>NÚMERO DE COMPONENTES</b>	1	2	3	3 (Trituradora opcional, extrusora, sistema de control)
<b>DIRECCIÓN DE EXTRUSIÓN</b>	Vertical	Horizontal	Horizontal	Horizontal
<b>ZONAS DE TEMPERATURA</b>	4	1	1	1
<b>ZONA DE CONTROL DE TEMPERATURA</b>	Si	No/No aplica	No/No aplica	No/No aplica
<b>ZONA DE MEZCLA</b>	No. En su lugar contiene un tornillo sinfín de alto flujo	No	No	No. Solamente un tipo de tornillo sinfín disponible
<b>SISTEMA DE ENFRIAMIENTO</b>	Sistema de doble ventilador incorporado	No incluido	Sistema de ventiladores en serie	Incorporado
<b>TIPO DE ENFRIAMIENTO</b>	Aire	Aire	Aire	Aire
<b>SISTEMA DE BOBINADO</b>	Incorporado	Separado	Separado	Incorporado
<b>CONTROL DE DIÁMETRO DE FILAMENTO</b>	Automático	Ninguno	Ninguno	Ninguno
<b>PRECIO DE LA UNIDAD DE EXTRUSIÓN (€)</b>	5300	300	749	3999



COMPañÍA	3devo	Filastruder	Felfil	ReDeTec
PRECIO DE LA UNIDAD DE BOBINADO (€)	Incluido	170	699	Incluido
PRECIO DE LA UNIDAD DE ENFRIAMIENTO (€)	Incluido	No disponible	Incluido	Incluido
PRECIO TOTAL (€)	5300	470	1448	3999

Tabla 28. Tabla comparativa entre filamentadora 3devo y filamentadoras nivel avanzado

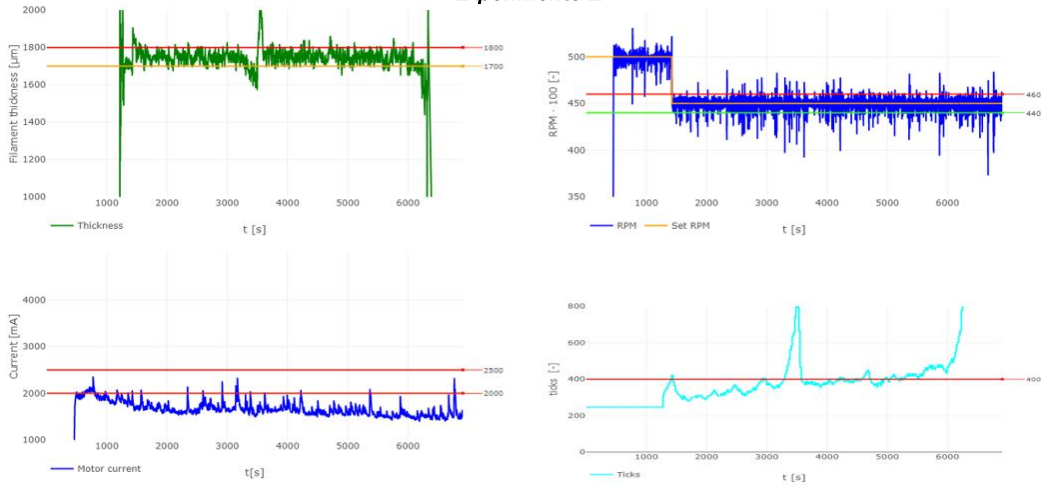
COMPañÍA	3DEVO	FILABOT	FILAFAB	NOZTEK	WELLZOOM
MODELO	Precision 350	EX6 completo	Kit Pro 350 EX	Sistema de extrusión completo	de Extruder Line II +
TEMPERATURA MÁXIMA DE EXTRUSIÓN	350 °C	400 °C (350 °C máx. recomendada)	200-400 (250) °C	400 °C ( 600-750 bajo encargo)	450 °C ( 600 bajo encargo)
NÚMERO DE COMPONENTES	1	3 (Extrusión, enfriamiento, bobinado)	3 (Extrusión, enfriamiento, bobinado)	4(Extrusora Excalibur, baño de agua, guiado de filamento, bobinadora)	3 (Extrusora, enfriamiento, bobinado)
DIRECCIÓN DE EXTRUSIÓN	Vertical	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal
ZONAS DE TEMPERATURA	4	4	1	3	2
ZONA DE CONTROL DE TEMPERATURA	Si	Si	No/No aplica	Si (Control independiente)	Si (Control independiente)
ZONA DE MEZCLA	No. En su lugar contiene un tornillo sinfín de alto flujo	Si (Depende del tipo de tornillo sinfín)	No. Solamente un tipo de tornillo sinfín disponible	No. Solamente un tipo de tornillo sinfín disponible	No. Solamente un tipo de tornillo sinfín disponible
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO	Sistema de doble ventilador incorporado	Incluido	Sistema de ventiaidores en serie (Separado)	Incluido	Incluido
TIPO DE ENFRIAMIENTO	Aire	Aire	Aire	Agua	Agua
SISTEMA BOBINADO	Incorporado	Incluido	Separado	Incluido	Incluido
CONTROL DE DIÁMETRO DE FILAMENTO	Automático	Manual	Control de temperatura y velocidad disponible	Manual	No



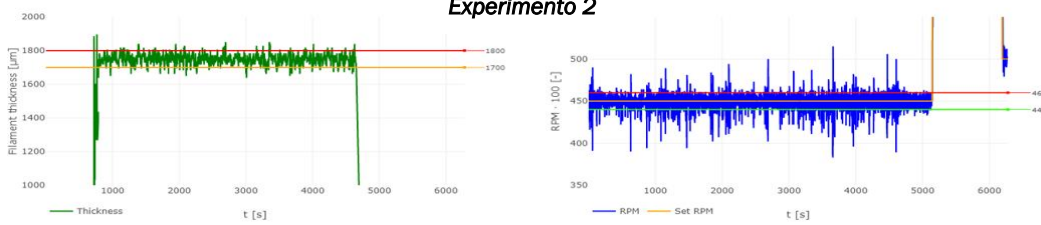


COMPañÍA	3devo	Filabot	FilaFab	Noztek	Wellzoom
PRECIO DE LA UNIDAD DE EXTRUSIÓN (€)	5300	12187	2103	7955	2380
PRECIO DE LA UNIDAD DE BOBINADO (€)	Incluido	4044	1108	695	Incluido
PRECIO DE LA UNIDAD DE ENFRIAMIENTO (€)	Incluido	Incluido	Incluido	6950	Incluido
PRECIO TOTAL (€)	5300	16231	3211	13995 (precio del pack)	2380

### Experimento 1



### Experimento 2



### Experimento 3

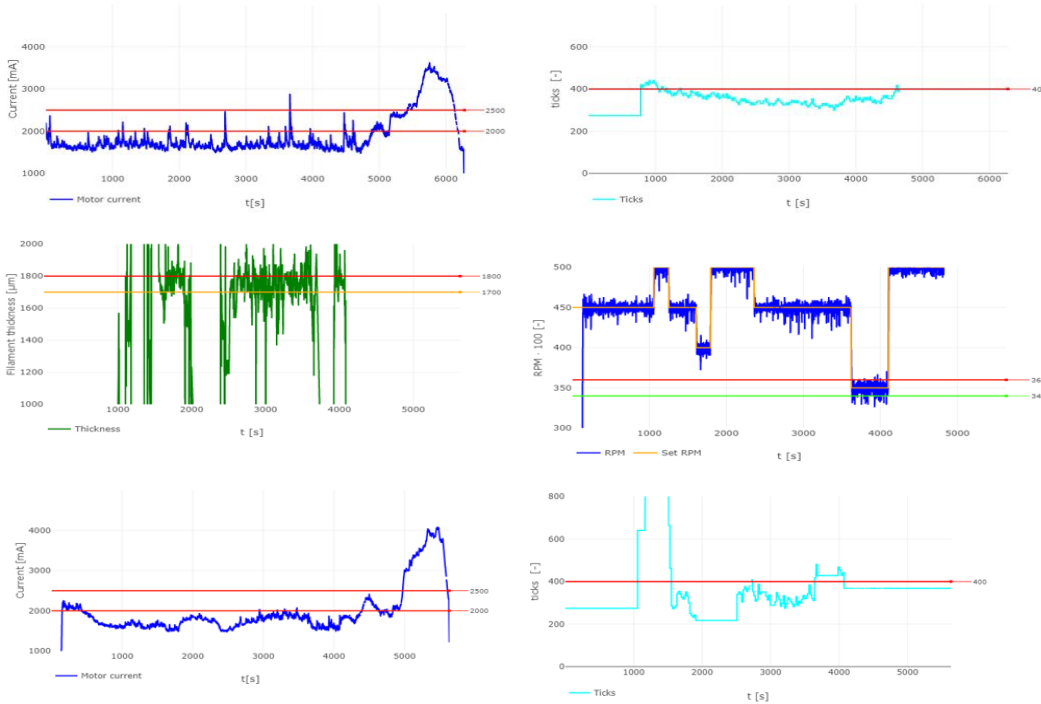
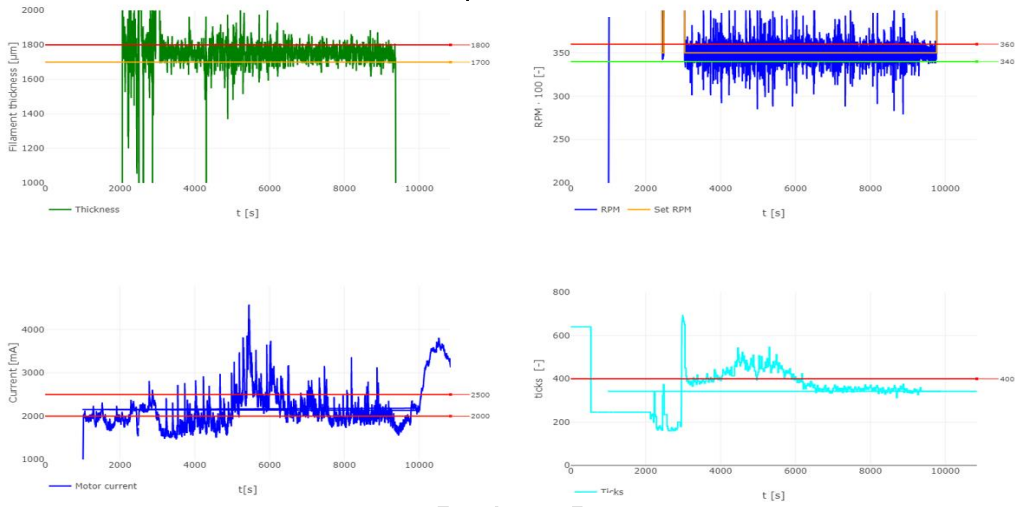
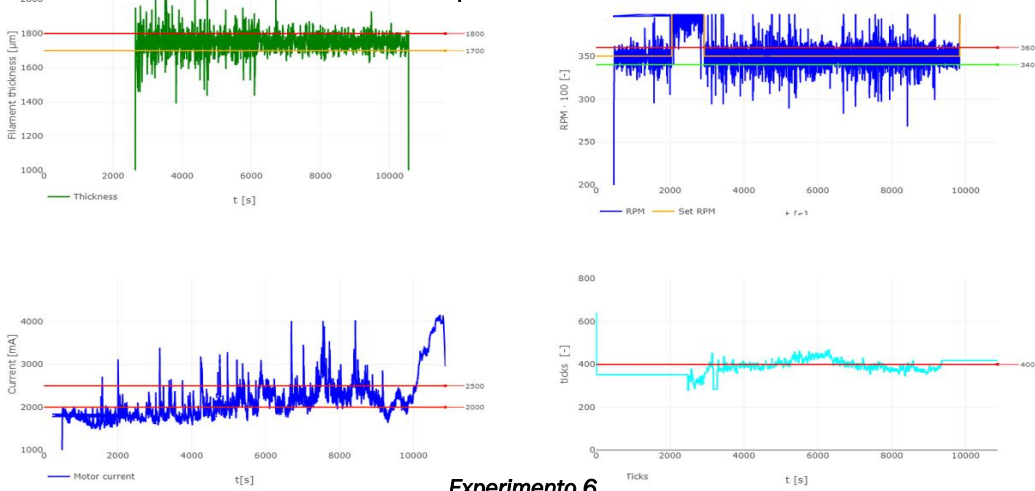


Figura 109. Gráficas del diámetro de filamento, velocidad del husillo, corriente del motor y velocidad el extractor (Experimentos 1, 2 y 3 PLA SmartMaterials) (Fuente Propia)

### Experimento 4



### Experimento 5



### Experimento 6

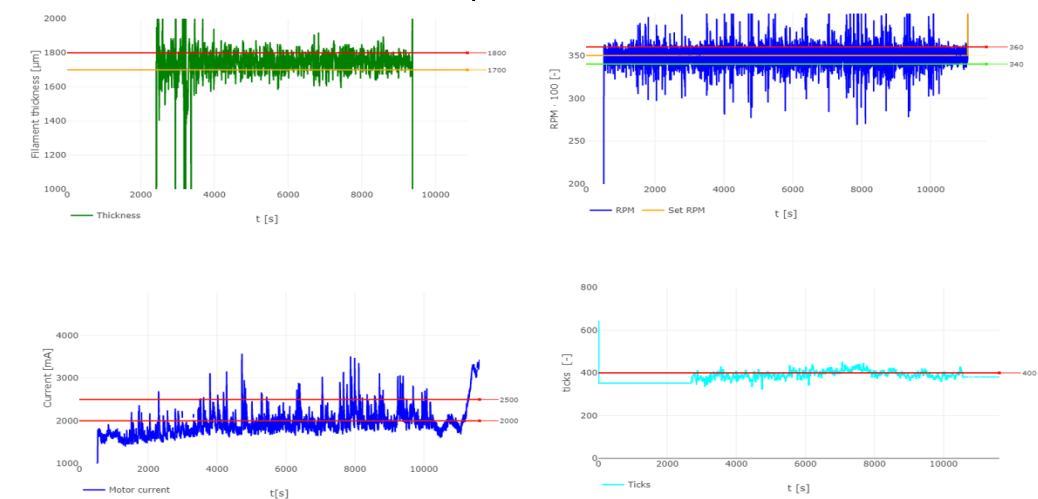
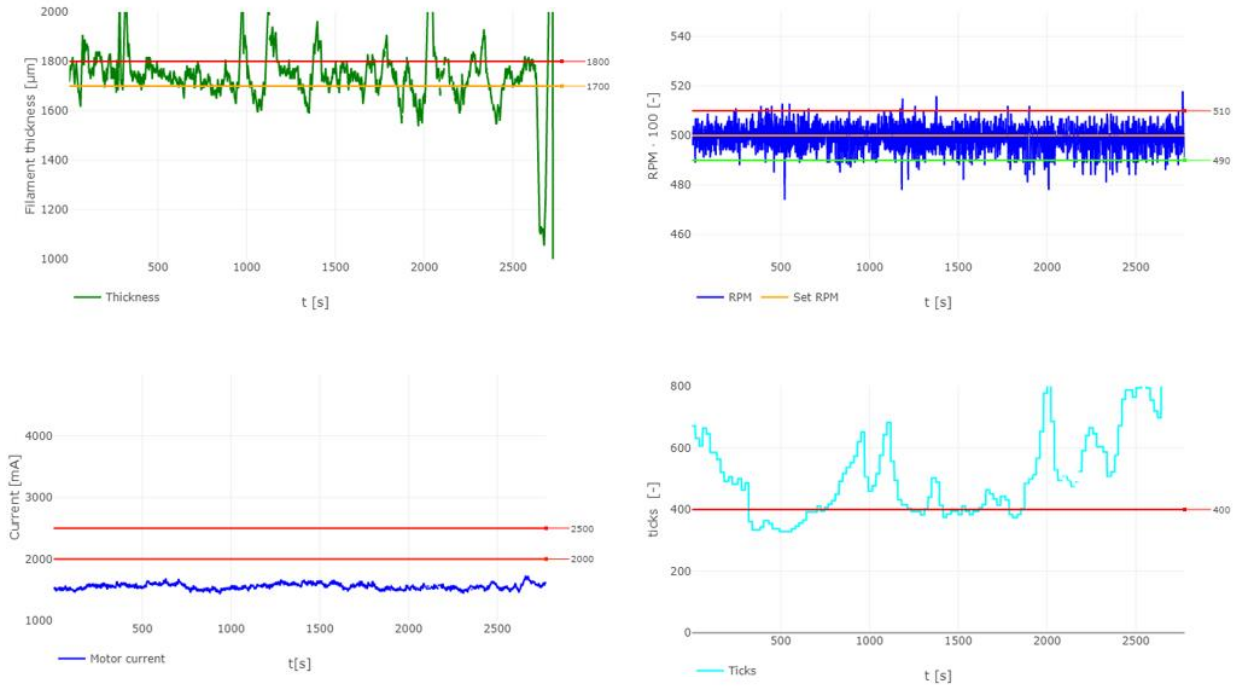


Figura 110. Gráficas del diámetro de filamento, velocidad del husillo, corriente del motor y velocidad el extractor (Experimentos 4, 5 y 6 PLA SmartMaterials) (Fuente Propia)

**Experimento 1**



**Experimento 2**

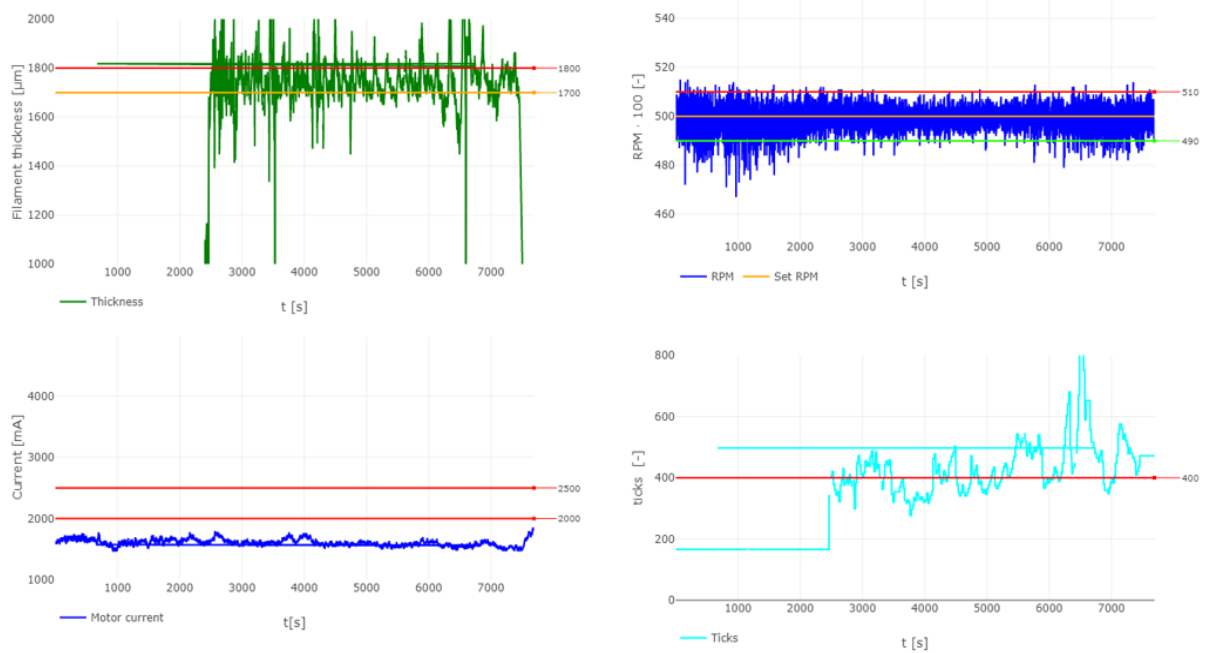


Figura 111. Gráficas del diámetro de filamento, velocidad del husillo, corriente del motor y velocidad el extractor (Experimentos 1 y 2 PP) (Fuente Propia)

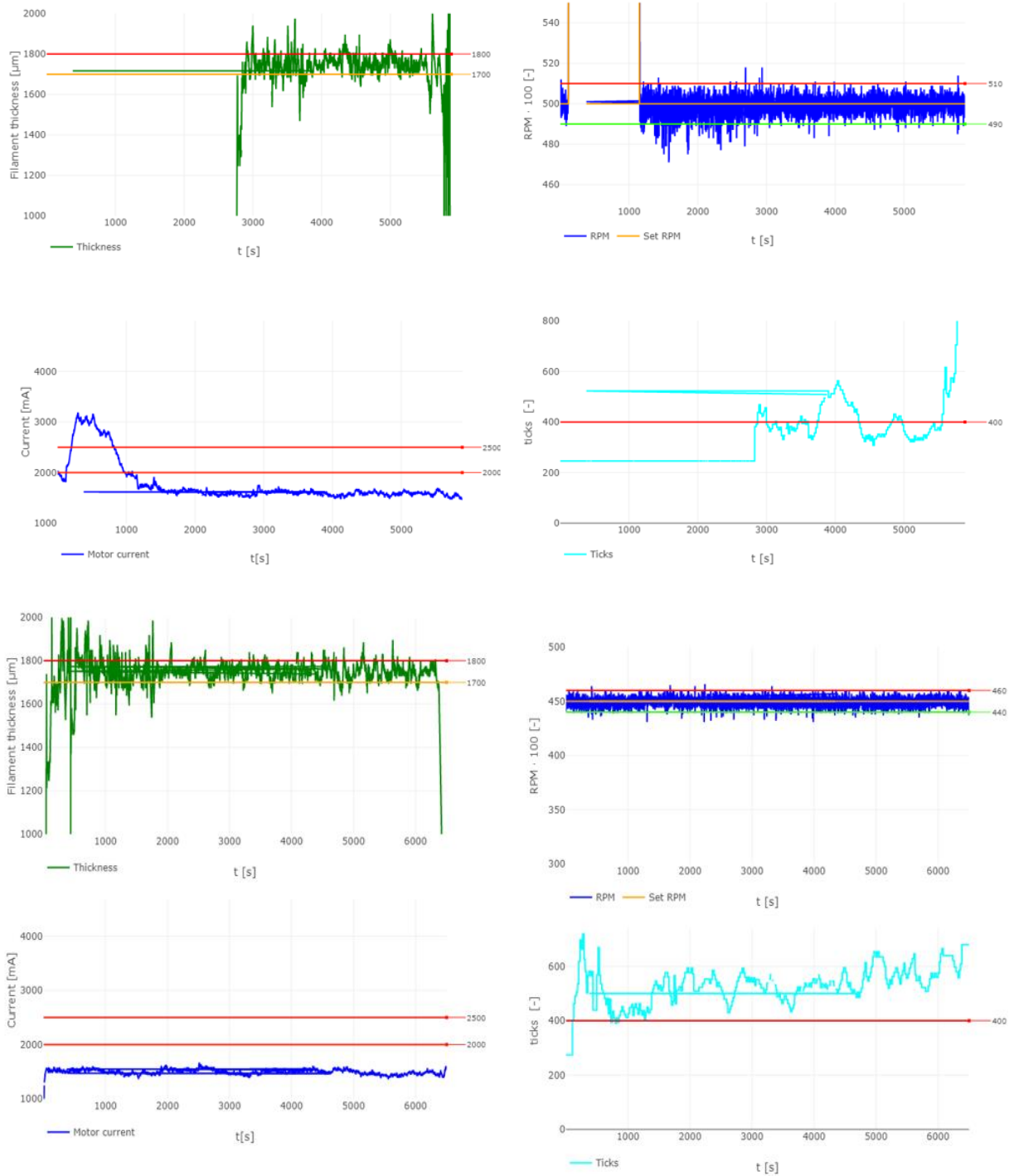


Figura 112. Gráficas del diámetro de filamento, velocidad del husillo, corriente del motor y velocidad el extractor (Experimentos 3 y 4 PP) (Fuente Propia)

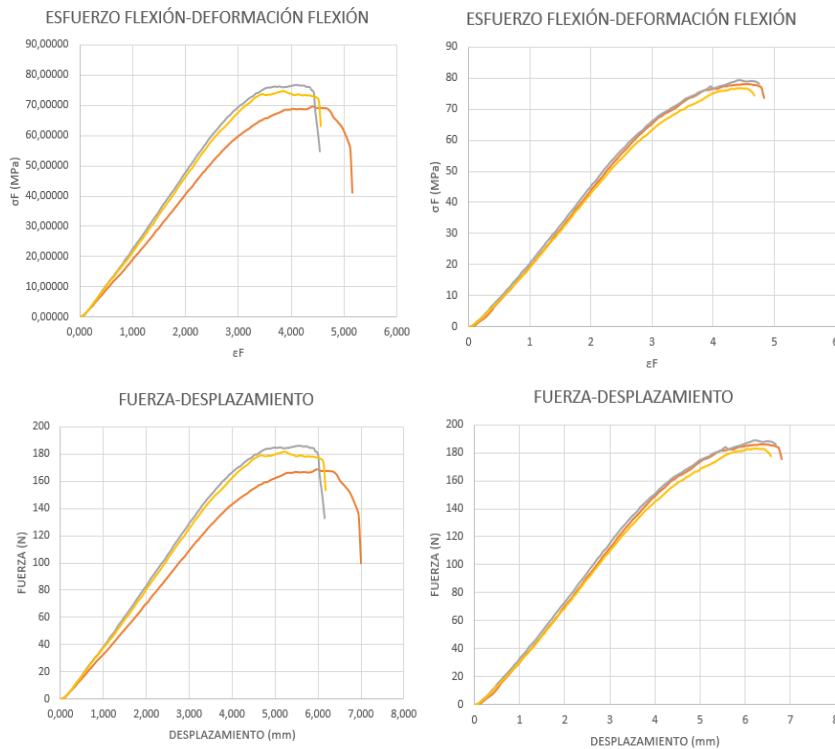


Figura 113. Gráficas Fuerza-Desplazamiento y Esfuerzo-Deformación (Exp 1 Bobina sin secar (izda) y seca (dcha) PLA SmartMaterials) (Fuente Propia)

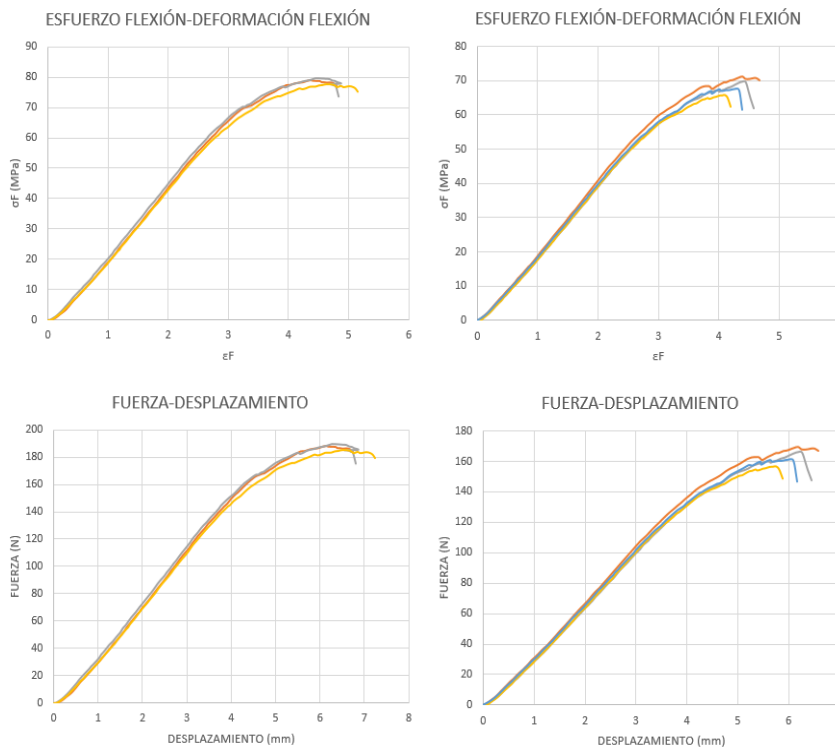


Figura 114. Gráficas Fuerza-Desplazamiento y Esfuerzo-Deformación (Exp. 2 y 4 PLA SmartMaterials) (Fuente Propia)

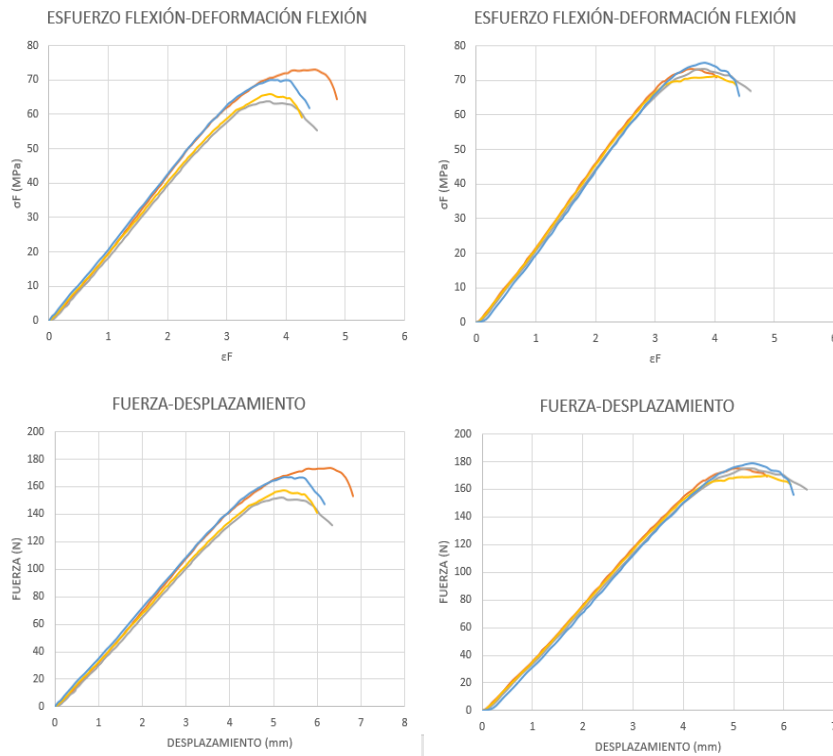


Figura 115. Gráficas Fuerza-Desplazamiento y Esfuerzo-Deformación (Exp. 5 y 6 PLA SmartMaterials) (Fuente Propia)

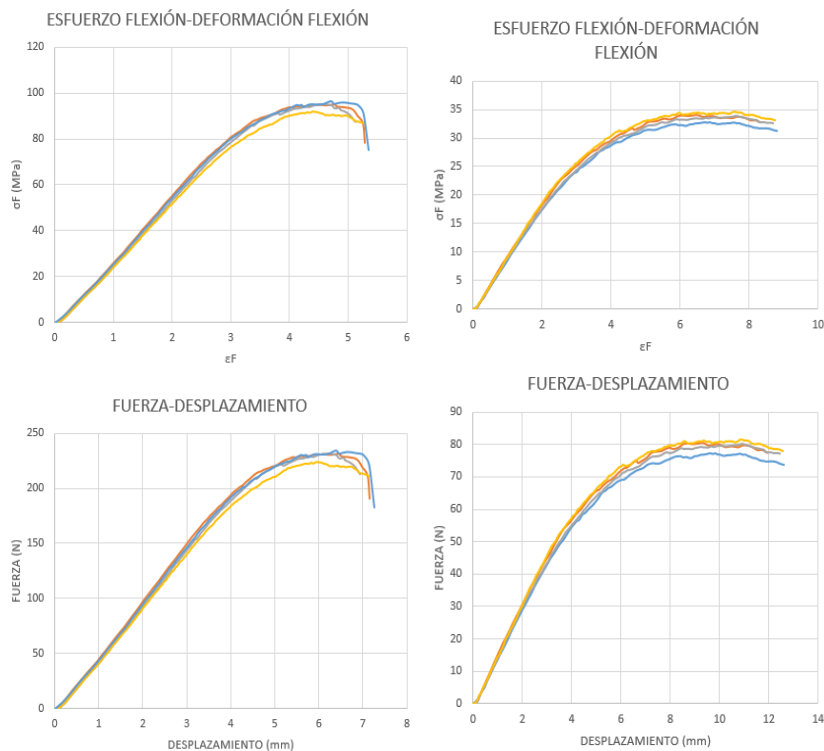


Figura 116. Gráficas Fuerza-Desplazamiento y Esfuerzo-Deformación (PLA Comercial (izad.) y Exp. 2 PP (dcha.)) (Fuente Propia)