



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

APLICACIÓN DE LA FABRICACIÓN GRANULAR ADITIVA (FGF): ADAPTACIÓN DE UNA IMPRESORA DE FDM Y ESTUDIO EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

Autor: Marina Martín Cadahía

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Junio de 2026

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título:
APLICACIÓN DE LA FABRICACIÓN GRANULAR ADITIVA (FGF): ADAPTACIÓN
DE UNA IMPRESORA DE FDM Y ESTUDIO EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS
DE IMPRESIÓN

en la ETS de Ingeniería en Tecnologías Industriales ICAI de la Universidad Pontificia
Comillas en el curso académico 2025/2026 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido
presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada

de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Marina Martín Cadahía Fecha: 10/ 07/ 2026

Autorizada la entrega del proyecto

El Director del Proyecto



Fdo: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 10/07/2026



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

APLICACIÓN DE LA FABRICACIÓN GRANULAR ADITIVA (FGF): ADAPTACIÓN DE UNA IMPRESORA DE FDM Y ESTUDIO EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

Autor: Marina Martín Cadahía

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Junio de 2026

Agradecimientos

Gracias a Mariano Jiménez Calzado, mi tutor del proyecto, por su orientación, disponibilidad y dedicación. Este trabajo no habría sido posible sin sus anotaciones y buenos consejos.

Asimismo, me gustaría agradecer también a mis padres y a mi hermana, por su apoyo incondicional durante toda la carrera.

Por último, quiero dar las gracias a mis amigas, por acompañarme durante todos estos años de estudio. Me siento muy afortunada de haberos conocido.

APLICACIÓN DE LA FABRICACIÓN GRANULAR ADITIVA (FGF): ADAPTACIÓN DE UNA IMPRESORA DE FDM Y ESTUDIO EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

Autor: Martín Cadahía, Marina.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El presente trabajo analiza la fabricación granular aditiva (FGF) desde dos puntos de vista. En primer lugar, se realizó la adaptación de una impresora doméstica de FDM para habilitar la impresión con pellets. En segundo lugar, se llevó a cabo un estudio experimental preliminar de parámetros de impresión en una impresora FGF comercial. Por último, se analizaron los beneficios y debilidades de esta tecnología frente a la impresión con FDM.

Palabras clave: Pellets, FGF, FDM

1. Introducción

Desde sus inicios a finales de la década de los ochenta, con el desarrollo de la tecnología de impresión 3D mediante deposición de material fundido (FDM), la fabricación aditiva ha experimentado un notable desarrollo, ampliando progresivamente sus aplicaciones, desde la fabricación de prototipado rápido hasta la fabricación de estructuras a gran escala. Sin embargo, la dependencia del filamento como materia prima supone una limitación tanto económica como productiva. En este contexto, la fabricación aditiva granular permite emplear pellets directamente en el proceso de impresión, eliminando la etapa intermedia de fabricación de filamento y reduciendo potencialmente los costes y el tiempo de producción.

2. Definición del proyecto

Con el fin de realizar un estudio lo más completo posible de esta tecnología, el trabajo se divide en dos partes:

- Por un lado, se tenía una impresora de escritorio de FDM del laboratorio de ICAI, fabricada por Jaime Rodríguez Rodríguez, antiguo alumno de la universidad^[1]. El objetivo era adaptarla para la extrusión de pellets modificando tanto la estructura, como el código base de la impresora.
- Por otro lado, se realizaron experimentos con una impresora 3D de gran formato, la *G5 Ultra Pellet 3D Printer*, con intención de determinar los parámetros óptimos de impresión para, en este caso, dos materiales básicos de fabricación aditiva: el PLA y el ABS.

Adicionalmente y con los resultados obtenidos de estas dos partes, se comparó la fabricación granular aditiva con la tecnología FDM. La razón de elegir este tipo de impresión como referente, recae en que ambas tecnologías son muy similares, siendo la impresión con pellets una evolución directa de la de filamento. Por este motivo, la pregunta de investigación que guía el proyecto es: ¿Es la impresión FGF el relevo generacional del FDM?

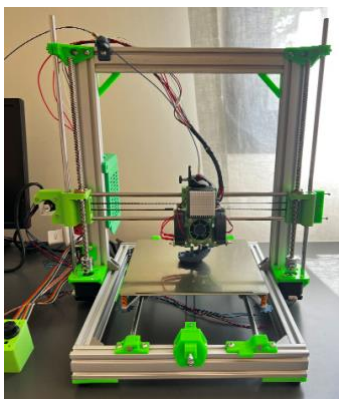
3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Un sistema de impresión 3D está compuesto por diversos elementos fundamentales que permiten su funcionamiento. Entre sus componentes principales se encuentran la cama de impresión, la extrusora, la interfaz de control mediante pantalla LCD y una estructura de soporte, generalmente fabricada en aluminio. Esta estructura incorpora sistemas de guiado que permiten el desplazamiento preciso de la extrusora a lo largo de los tres ejes de movimiento (x,y y z), posibilitando la deposición controlada del material durante el proceso de fabricación.

Por otro lado, está la placa base de la impresora donde se conectan los motores, sensores y resistencias, así como la fuente de alimentación. Esta contiene el código que controla a la impresora, siendo el firmware de código abierto de *Marlin* el que utiliza la doméstica y *Klipper* el empleado por la impresora comercial.

Asimismo, se utilizó CAD Solid Edge para realizar algunos de los modelos a imprimir, así como para el desarrollo del soporte de la extrusora. Posteriormente, se utilizaron los programas de laminado Cura Slicer y PioCreat Slicer con el objetivo de establecer los parámetros de fabricación y generar el archivo en formato G-code necesario para la ejecución del proceso de impresión.

Adicionalmente, mientras que la impresora de escritorio empleada se basa en la tecnología FDM mediante una plataforma Prusa, la impresora comercial utilizada corresponde al modelo G5 Ultra de la marca PioCreat, diseñada para la fabricación de piezas de gran formato. Además, con el fin de establecer una comparación entre las tecnologías FDM y FGF bajo condiciones lo más equivalentes posible, se seleccionó la impresora de filamento DT 600, disponible en el laboratorio y también orientada a la producción de piezas de gran escala. Esta elección permitió disponer de un equipo de referencia adecuado para evaluar las diferencias entre ambas tecnologías de fabricación aditiva.



(a)



(b)



(c)

Figura 1: (a) Impresora de FDM de escritorio (b) Impresora G5 Ultra de PioCreat (c) Impresora DT 600

4. Resultados

Como se ha mencionado anteriormente, el proyecto se dividió en dos partes. Con respecto a la adaptación de la impresora de escritorio, se eligió la extrusora de la marca Mahor para poder imprimir con pellets. Además, se modificó el firmware para que fuera posible alternar entre la configuración en modo filamento y en modo pellets. Esto se realizó gracias a que el software tiene ciertos comandos de impresión, que se aplican en función de lo que elija el usuario, obteniendo:

```
// Custom Menu: Main Menu
#define CUSTOM_MENU_MAIN
#define CUSTOM_MENU_MAIN_TITLE "Extrusion Mode"
#define MAIN_MENU_ITEM_1_DESC "Perfil Filamento"
#define MAIN_MENU_ITEM_1_GCODE \
    "M92 E420\n" \
    "M203 X400 Y400 E50\n" \
    "M204 T500\n" \
    "M301 P20.06 I1.13 D87.3\n" \
    "M500"
#define MAIN_MENU_ITEM_2_DESC "Perfil Pellets"
#define MAIN_MENU_ITEM_2_GCODE \
    "M92 E725.2\n" \
    "M203 X120 Y120 E15\n" \
    "M204 T500\n" \
    "M301 P30 I2 D200\n" \
    "M500"
```

Figura 2: Código con la definición de los perfiles del menú filamento-pellets

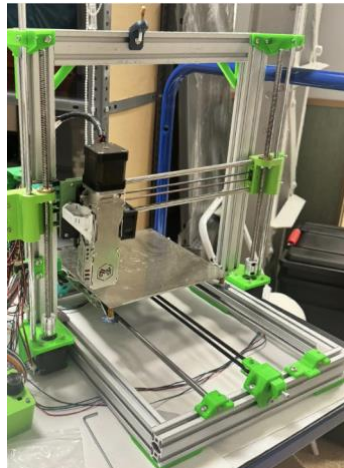


Figura 3: Impresora 3D de escritorio adaptada para pellets

En relación con la elección de parámetros óptimos de impresión, se comenzaron a realizar ensayos utilizando los parámetros definidos a partir del estado del arte. Sin embargo, fue necesario efectuar varias modificaciones, imprimiendo en modo *spiral base*, con el fin de aislar parámetros y centrar el análisis únicamente en aquellos que más afectan a la calidad

de las piezas impresas mediante tecnología FGF: la temperatura y la velocidad. A través de un proceso iterativo, en el que variaron los valores de estos parámetros, se obtuvieron finalmente piezas impresas en ABS y PLA con resultados satisfactorios.

Parámetros óptimos

Nombre del parámetro			Valor ABS	Valor PLA
Temperatura	Parte Alta (Upper Nozzle)	Primera capa	225°C	200°C
		Resto de capas	220°C	195°C
	Parte Baja (Nozzle)	Primera capa	235°C	220°C
		Resto de capas	230°C	210°C
	Cama	Primera capa	90°C	65°C
		Resto de capas	90°C	60°C
Altura de capa (mm)	Primera capa		0.6 mm	0.45 mm
	Resto de capas		0.5 mm	0.55 mm
Velocidad (mm/s)	Primera capa		10 mm/s	10 mm/s
	Resto de capas		11 mm/s	11 mm/s
	Perímetro		40 mm/s	40 mm/s
	Viaje		100 mm/s	100 mm/s
Ancho de extrusión (mm)	Primera capa		1.4 mm	1.4 mm
	Resto de capas		1.1 mm	1.1 mm
Spiral base			Habilitado	Habilitado

De igual forma, para la comparación con el FDM, se realizaron simulaciones con Cura Slicer con la impresora DT 600 donde se obtuvieron los siguientes resultados:

	<i>ABS</i>		<i>PLA</i>	
	FGF	FDM	FGF	FDM
Tiempo en imprimir una pieza	6h	16h16min	8h12min	16h16min
Coste unitario (€/un)	12,96	145,22	15,36	145,30
Coste total	38,88	435,67	46,08	435,89
Ahorro unitario	132,26 €/un		129,94 €/un	
Ahorro total	396,78 €		389,82 €	

Tabla 1: Comparación de costes entre FGF y FDM

5. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en este proyecto, se ha demostrado la viabilidad de adaptar una impresora FDM de escritorio para trabajar con material granular mediante la sustitución del extrusor de filamento convencional por un sistema de extrusión de pellets, así como mediante la modificación del firmware para permitir la alternancia entre ambas tecnologías en función de los requerimientos de cada aplicación. Esta adaptación posibilita la reutilización de equipos existentes, reduciendo la necesidad de adquirir nuevos sistemas de fabricación aditiva y favoreciendo un enfoque más sostenible, en consonancia con los principios de la economía circular.

Paralelamente, se realizaron los ensayos con la impresora de gran formato PioCreat G5 Ultra, en la que se determinaron parámetros óptimos de impresión con PLA y ABS, obteniendo piezas funcionales de calidad aceptable.

Los resultados muestran que la impresión FGF ofrece ventajas en productividad y tiempo de fabricación, aunque presenta limitaciones en el acabado superficial debido a la dinámica del flujo de pellet y al sistema de extrusión mediante tornillo sinfín. También se identificaron problemas de sobre extrusión y aparición de *blobs*, especialmente en las primeras capas, lo que evidencia que el control del flujo en FGF es más complejo que en FDM. Por ello, se recomienda el uso de varias capas iniciales y la incorporación de un cerramiento que estabilice las condiciones térmicas de impresión.

A pesar de estas limitaciones, el FGF demuestra un gran potencial para aplicaciones de gran formato donde la rapidez de fabricación y la reducción de costes son prioritarias frente al acabado superficial. Finalmente, en relación con la pregunta de investigación planteada sobre si el FGF supone el relevo generacional del FDM, se concluye que el FGF no debe considerarse un sustituto directo, sino una evolución complementaria. Aunque esta tecnología sí que mejora significativamente la eficiencia de material, la escalabilidad y la estabilidad del proceso. Por tanto, ambas tecnologías están llamadas a coexistir ocupando cada una, nichos distintos dentro de la fabricación aditiva.

Este trabajo establece una base sólida para futuras investigaciones orientadas a optimizar parámetros de impresión con distintos materiales, así como con mezcla de materiales reciclados. Además del estudio de propiedades mecánicas de las piezas fabricadas, tomando como referencia la fabricación aditiva con filamento. Por tanto, el siguiente paso consistiría reducir la brecha de rendimiento entre ambas tecnologías, con el objetivo de obtener piezas fabricadas con tecnología FGF con la misma calidad que con sistemas de FDM convencionales.

6. Referencias

4. Rodríguez, J. R., & Calzado, M. J. (s. f.). *DISEÑO, FABRICACIÓN Y MONTAJE DE UNA IMPRESORA 3D (FDM)*. ONU. (2015, septiembre 25). *Objetivos de desarrollo sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
12. Liu, S., Zhao, P., Wu, S., Zhang, C., Fu, J., & Chen, Z. (2019). *A Pellet 3D Printer: Device Design and Process Parameters Optimization*. *Advances in Polymer Technology*, 2019, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2019/5075327>
13. Gupta, A. K., & Taufik, M. (2021). *Effect of process variables on performances measured in filament and pellet-based extrusion process*. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5177-5184. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.508>

APPLICATION OF FUSED GRANULAR FABRICATION (FGF): ADAPTATION OF AN FDM PRINTER AND EXPERIMENTAL STUDY OF PRINTING PARAMETERS

Author: Martín Cadahía, Marina.

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This work analyses Fused Granular Fabrication (FGF) from two different perspectives. First, a desktop FDM printer was adapted to enable pellet-based printing. Second, a preliminary experimental study of printing parameters was carried out using a commercial FGF printer. Finally, the advantages and limitations of this technology were analysed in comparison with conventional FDM printing.

Keywords: Pellets, FGF, FDM

1. Introduction

Since its emergence in the late 1980s, fused deposition modelling (FDM) 3D printing technology has undergone significant development, progressively expanding its applications from rapid prototyping to the manufacturing of large-scale structures. However, the dependence on filament as the raw material represents both an economic and production-related limitation. In this context, granular additive manufacturing enables the direct use of pellets in the printing process, eliminating the intermediate filament production stage and potentially reducing both manufacturing costs and production time.

2. Project Definition

In order to carry out the most comprehensive study possible of this technology, the work was divided into two main parts:

- On the one hand, a desktop FDM printer from the ICAI laboratory, originally built by Jaime Rodríguez Rodríguez, a former university student, was available. The objective was to adapt it for pellet extrusion by modifying both the printer structure and its firmware code.
- On the other hand, experiments were performed using a large-format 3D printer, the G5 Ultra Pellet 3D Printer, with the aim of determining optimal printing parameters for two common additive manufacturing materials: PLA and ABS.

Additionally, based on the results obtained from these two parts, a comparison between Fused Granular Fabrication and FDM technology was carried out. FDM was selected as the reference technology because both systems are highly similar, with pellet-based printing

representing a direct evolution of filament-based printing. Consequently, the research question guiding this project is: Is FGF printing the next-generation replacement for FDM?

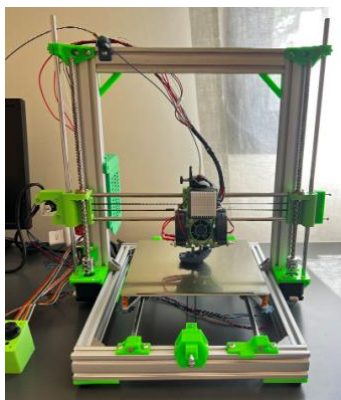
3. Description of the Model-System-Tool

A 3D printing system consists of several key components. First, there is the printer structure itself, which includes the print bed, extruder, LCD screen, and the frame, typically made of aluminium, with guide rails that allow the extruder to move along the x, y, and z axes.

In addition, the printer contains a motherboard to which the motors, sensors, heating elements, and power supply are connected. This board contains the code that controls the printer operation, with the open-source Marlin firmware being used in the desktop printer and Klipper firmware in the commercial printer.

Furthermore, Solid Edge CAD software was used to design some of the models to be printed, while Cura Slicer and PioCreat Slicer software were employed to define printing parameters and convert the files into G-code.

The desktop printer was built from scratch based on a Prusa-style FDM printer, whereas the commercial system used was the PioCreat G5 Ultra, designed for large-format parts. Likewise, in order to establish a comparison between FDM and FGF under the most similar baseline conditions possible, the DT600 filament printer was selected as the FDM reference machine, since it was available in the laboratory and also capable of producing large-format parts and therefore provided an ideal benchmark for the analysis.



(a)



(b)



(c)

Figura 4: (a) Desk FDM 3D printer (b) G5 Ultra de PioCreat printer (c) DT 600 printer

4. Results

As previously mentioned, the project was divided into two main parts. Regarding the adaptation of the desktop printer, a Mahor extruder was selected in order to enable pellet-based printing. In addition, the printer firmware was modified so that it became possible to switch between filament mode and pellet mode configurations. This was achieved by implementing specific printing commands within the software, which are executed depending on the mode selected by the user, resulting in the following configuration:

```
// Custom Menu: Main Menu
#define CUSTOM_MENU_MAIN
#define CUSTOM_MENU_MAIN_TITLE "Extrusion Mode"
#define MAIN_MENU_ITEM_1_DESC "Perfil Filamento"
#define MAIN_MENU_ITEM_1_GCODE \
    "M92 E420\n" \
    "M203 X400 Y400 E50\n" \
    "M204 T500\n" \
    "M301 P20.06 I1.13 D87.3\n" \
    "M500"
#define MAIN_MENU_ITEM_2_DESC "Perfil Pellets"
#define MAIN_MENU_ITEM_2_GCODE \
    "M92 E725.2\n" \
    "M203 X120 Y120 E15\n" \
    "M204 T500\n" \
    "M301 P30 I2 D200\n" \
    "M500"
```

Figura 5: Código con la definición de los perfiles del menú filamento-pellets

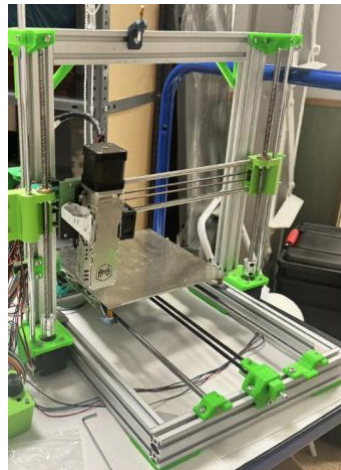


Figura 6: Impresora 3D de escritorio adaptada para pellets

Regarding the selection of optimal printing parameters, several tests were initially carried out using parameters defined according to the state of the art. However, multiple adjustments were required, printing in *spiral base* mode in order to isolate parameters and focus the analysis exclusively on those with the greatest influence on the quality of FGF-printed parts: temperature and printing speed. Through an iterative process in which the

values of these parameters were progressively modified, satisfactory ABS and PLA printed parts were finally obtained.

Optimal parameters

Parameter name			ABS	PLA
Temperature	Upper Nozzle	First layer	225°C	200°C
		Rest of layers	220°C	195°C
	Nozzle	First layer	235°C	220°C
		Rest of layers	230°C	210°C
	Cama	First layer	90°C	65°C
		Rest of layers	90°C	60°C
Layer height (mm)		First layer	0.6 mm	0.45 mm
		Rest of layers	0.5 mm	0.55 mm
Velocity (mm/s)		First layer	10 mm/s	10 mm/s
		Rest of layers	11 mm/s	11 mm/s
Extrusion width (mm)		First layer	1.4 mm	1.4 mm
		Rest of layers	1.1 mm	1.1 mm
Spiral base			Enabled	Enabled

Likewise, for the comparison with FDM technology, simulations were performed using Cura Slicer with the DT600 printer. Subsequently, the cost analysis was carried out and compared with the one done for the FGF technology:

	<i>ABS</i>		<i>PLA</i>	
	FGF	FDM	FGF	FDM
Printing time of one piece	6h	16h16min	8h12min	16h16min
Unit cost (€/un)	12,96	145,22	15,36	145,30
Total cost	38,88	435,67	46,08	435,89
Unit savings	132,26 €/un		129,94 €/un	
Total savings	396,78 €		389,82 €	

Tabla 2: Comparación de costes entre FGF y FDM

5. Conclusions

Based on the results obtained in this project, the feasibility of adapting a desktop FDM printer to work with granular materials has been demonstrated by replacing the conventional filament extruder with a pellet extrusion system, as well as by modifying the firmware to enable switching between both technologies depending on the requirements of each application. This adaptation allows the reuse of existing equipment, reducing the need to acquire new additive manufacturing systems and promoting a more sustainable approach in line with the principles of the circular economy.

Additionally, large-format printing tests were carried out using the PioCreat G6 Ultra printer, in which optimal printing parameters for PLA and ABS were determined, resulting in functional parts with acceptable quality.

The results show that FGF printing offers advantages in terms of productivity and manufacturing time; however, it presents limitations regarding surface finish due to pellet

flow dynamics and the screw-based extrusion system. Problems related to over-extrusion and blob formation were also identified, particularly in the initial layers, highlighting that flow control in FGF is more complex than in FDM. Therefore, the use of multiple initial layers and the incorporation of an enclosure to stabilize the thermal conditions during printing are recommended.

Despite these limitations, FGF demonstrates significant potential for large-format applications where manufacturing speed and cost reduction are prioritized over surface finish. Finally, regarding the research question addressed in this work, namely whether FGF represents the next generational step beyond FDM, it is concluded that FGF should not be considered a direct replacement, but rather a complementary evolution of additive manufacturing technologies. Although FGF significantly improves material efficiency, scalability, and process stability, both technologies are expected to coexist, each occupying different application niches within the field of additive manufacturing.

This work establishes a solid foundation for future research aimed at optimizing printing parameters for different materials, as well as for the incorporation of recycled material blends. Further studies should also focus on the mechanical characterization of the manufactured parts, using filament-based additive manufacturing as a benchmark. Therefore, the next step would be to reduce the performance gap between both technologies, with the objective of achieving FGF-manufactured parts with quality levels comparable to those obtained through conventional FDM systems.

6. References

4. Rodríguez, J. R., & Calzado, M. J. (s. f.). *DISEÑO, FABRICACIÓN Y MONTAJE DE UNA IMPRESORA 3D (FDM)*. ONU. (2015, septiembre 25). *Objetivos de desarrollo sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
12. Liu, S., Zhao, P., Wu, S., Zhang, C., Fu, J., & Chen, Z. (2019). *A Pellet 3D Printer: Device Design and Process Parameters Optimization*. *Advances in Polymer Technology*, 2019, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2019/5075327>
13. Gupta, A. K., & Taufik, M. (2021). *Effect of process variables on performances measured in filament and pellet-based extrusion process*. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5177-5184. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.508>

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Motivación del proyecto	8
1.2 Objetivos	8
1.3 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	9
Capítulo 2. Estado del arte	11
2.1 Impresoras 3D en el mercado.....	11
2.1.1 Selective Laser Sintering (SLS).....	12
2.1.2 Multi Jet Fusion (MJF)	13
2.1.3 Laminating Object Manufacturing (LOM).....	14
2.1.4 Fused Deposition Modeling (FDM).....	15
2.1.5 Fused Granulate fabrication (FGF)	16
2.2 Comparación entre FDM y FGF	18
2.3 Ventajas de impresión FGF.....	19
2.4 ¿Cómo funciona la impresión con pellets?	21
2.4.1 Descripción del proceso interno de extrusión.....	21
2.4.2 Influencia de la inercia en el proceso de extrusión	22
2.4.3 Limitaciones de la impresión FGF.....	23
2.4.4 Sistemas de extrusión de pellets	23
2.5 Parámetros críticos para el diseño de impresoras 3D FGF	25
2.5.1 Zonas de extrusión	26
2.5.2 Boquillas de impresión.....	28
2.5.3 Control del flujo de material y retracción	29
2.6 Materiales para impresión 3D	30
2.6.1 Diferencia entre material reciclado y reciclable	32
2.6.2 Mezcla de materiales.....	33
Capítulo 3. Definición del Trabajo	36
3.1 Justificación.....	36
3.2 Dimensión y contribuciones del trabajo.....	37
Capítulo 4. Metodología	38
4.1 Planificación y Estimación Económica.....	39

4.2 Descripción de los materiales.....	40
4.3 Descripción de las tecnologías	42
4.3.1 Impresora de pellets PIOCREAT G5 ULTRA.....	42
4.3.2 Impresora de FDM DT600.....	46
4.4 Descripción de programas.....	47
4.4.1 Slicer.....	47
4.4.2 Firmwares de configuración de impresoras	48
4.5 Elección de parámetros de impresión	49
Capítulo 5. Desarrollo del Trabajo	52
5.1 Adaptación de una impresora 3D de filamento a pellets.....	52
5.1.1 Elección de extrusor.....	52
5.1.2 Modificación de la impresora	53
5.1.3 Ajuste del firmware	54
5.2 Ensayos experimentales con una impresora 3D comercial.....	58
5.2.1 Patrones de test.....	58
5.2.2 Impresión 3D con ABS y PLA	59
Capítulo 6. Análisis de los resultados	66
6.1 Análisis de variables de proceso	66
6.1.1 Temperatura	66
6.1.2 Altura de capa.....	66
6.1.3 Velocidad de impresión.....	67
6.1.4 Spiral base.....	68
6.1.5 Acoplamiento de capas.....	69
6.2 Optimización de parámetros de impresión.....	70
6.3 Comparativa con FDM.....	71
6.3.1 Coste económico y reducción del tiempo de impresión	72
6.3.2 Reducción del impacto ambiental	74
6.3.3 Potencial del FGF.....	76
Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros.....	77
7.1 Objetivos cumplidos y aportaciones	77
7.2 Trabajos futuros	78
7.3 Conclusión.....	79
Capítulo 8. Bibliografía.....	81

ANEXO I 85

Índice de figuras

Figura 1: (a) Impresora de FDM de escritorio (b) Impresora G5 Ultra de PioCreat (c) Impresora DT 600.....	8
Figura 2: Código con la definición de los perfiles del menú filamento-pellets.....	9
Figura 3: Impresora 3D de escritorio adaptada para pellets	9
Figura 4: (a) Desk FDM 3D printer (b) G5 Ultra de PioCreat printer (c) DT 600 printer ..	13
Figura 5: Código con la definición de los perfiles del menú filamento-pellets.....	14
Figura 6: Impresora 3D de escritorio adaptada para pellets	14
Figura 7: Objetivos de desarrollo sostenible ^[2]	10
Figura 8: Esquema del funcionamiento del SLS ^[4]	13
Figura 9: Esquema de la impresión por MJF ^[6]	14
Figura 10: Esquema de impresión por LOM ^[6]	15
Figura 11: Esquema del funcionamiento del FDM	16
Figura 12:(a) Diagrama de flujo del sistema (b) Detalle de la impresora dividido en tres partes ^[12]	18
Figura 13: Esquema de las partes de un extrusor de pellets	24
Figura 14: Zonas de calor segmentadas de la impresora PioCreat G5 Ultra ^[15]	27
Figura 15: Esquema del interior de un extrusor de filamento y de pellets	29
Figura 16: Diagrama de Gantt del proyecto	39
Figura 17: Análisis de costes de FGF	40
Figura 18: ABS en forma de pellets	42
Figura 19: Impresora PioCreat G5 Ultra	43
Figura 20: Impresora PioCreat del laboratorio de fabricación de ICAI	44
Figura 21: Compuerta que permite el intercambio de pellets de diferente material.....	45
Figura 22: Funcionamiento del sistema de nivelación láser ^[15]	46
Figura 23: Impresora de FDM DT600.....	47
Figura 24: Logo de la marca UltiMaker y del software UltiMaker Cura	47
Figura 25: Logo PioCreat slicer software.....	48
Figura 26: Logos de Marlin Firmware, Visual Studio Code y PlatformIO IDE	48
Figura 27: Logo del Firmware para impresoras 3D Klipper	49

Figura 28: Extrusoras de pellets	53
Figura 29: Impresora de escritorio adaptada a pellets	53
Figura 30: Soporte utilizado para la extrusora de Mahor (a)parte fijada en la extrusora (b) parte fijada en la impresora	54
Figura 31: Código para definir el entorno de Marlin.....	54
Figura 32: Código que indica el tipo de placa utilizada en la impresora.....	54
Figura 33: Código para definir los drivers de la impresora	55
Figura 34: Código de definición de la pantalla.....	55
Figura 35: Pantalla LCD RAMPS MKS MINI 12864	55
Figura 36: Resultados de la calibración del control PID	56
Figura 37: Código con la definición de los perfiles del menú filamento-pellets.....	58
Figura 38: Patrón de test Plant_Pot	58
Figura 39: Vasija utilizada como referencia	59
Figura 40: laminado de la maceta con ABS	60
Figura 41: Problemas con la primera capa de ABS.....	60
Figura 42: Piezas impresas con ABS.....	63
Figura 43: Pieza de PLA.....	65
Figura 44: Parámetros de impresión para FGF y FDM	72
Figura 45: Análisis de costes de la impresora DT 600	73

Índice de tablas

Tabla 1: Comparación de costes entre FGF y FDM	10
Tabla 2: Comparación de costes entre FGF y FDM	15
Tabla 3: Comparativa de Impresión 3D FGF y FDM	19
Tabla 4: Temperaturas de extrusión por cada material.....	49
Tabla 5: Valores de velocidad	50
Tabla 6: Valores de altura de capa.....	50
Tabla 7: Extrusoras candidatas	53
Tabla 8: Tabla con parámetros teóricos iniciales del ABS.....	61
Tabla 9: Tabla con parámetros óptimos del ABS.....	62
Tabla 10: Tabla con parámetros teóricos iniciales del PLA	64
Tabla 11: Tabla con parámetros óptimos del PLA	65
Tabla 12: Comparación de costes entre FGF y FDM	73
Tabla 13: Comparación de costes entre FGF y FDM con costes de máquina idénticos	74

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios a finales de los años ochenta, la impresión 3D ha experimentado un importante desarrollo, ampliando progresivamente sus aplicaciones, desde el prototipado rápido hasta la construcción de infraestructuras. Además, en la actualidad existen sistemas de fabricación aditiva para imprimir con casi todo tipo de material, ya sean termoplásticos con tecnología FDM hasta metales con tecnología SLM.

En el caso de un sistema de filamento por deposición fundida (FDM), nos encontramos con que el proceso de impresión depende de la fabricación anterior del filamento, lo que supone una limitación tanto económica como productiva. La impresión 3D por pellets o FGF (Fused Granular Fabrication), permite superar este desafío al seguir un proceso similar al FDM, pero sin la necesidad de filamento, imprimiendo directamente el material en bruto en forma de pellets.

Este tipo de impresión no solo supone una reducción del ciclo de trabajo, si no que posee un gran potencial para la reutilización y mezcla de materiales. Esto puede resultar especialmente beneficioso para conceder a la pieza impresa propiedades mejor adaptadas a su aplicación final y para contribuir al desarrollo de la economía circular. De este modo también se podrían reutilizar materiales declarados en un inicio inservibles, como aquellos de piezas defectuosas o restos de soportes de impresión.

Tomando esto en consideración, el presente trabajo analiza la fabricación granular aditiva desde dos puntos de vista. Por un lado, se realizará la adaptación de una impresora de FDM de escritorio para la extrusión de pellets. Por otra parte, se llevará a cabo un estudio preliminar experimental de parámetros de impresión óptimos para una impresora FGF comercial de gran formato. Finalmente, y en base a los resultados obtenidos, se analizará el potencial de la impresión por pellets tomando como referencia la tecnología FDM, considerada su equivalente más directo.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

En este contexto, la tecnología FGF surge como alternativa a sistemas FDM convencionales basados en filamento, usando el uso directo de pellets como materia prima, lo que implicaría una manera más eficiente y rentable de impresión 3D. Basándose en estos principios, la motivación de este proyecto se fundamenta en tres pilares importantes:

- **Eficiencia económica:** como hemos visto previamente, la impresión con pellets implica tanto la bajada de costes operativos, ya que nos quitamos el paso de procesar el material y convertirlo en filamento como la reducción del ciclo de trabajo.
- **Sostenibilidad:** hoy en día no podemos llevar a cabo un proyecto de ingeniería sin pensar en su impacto ambiental. En primer lugar, el gasto energético total es menor y, en segundo lugar, esta tecnología favorece a la economía circular mediante el uso de reciclado y mezcla de pellets.
- **Investigación en el ámbito de la ingeniería:** llevar a cabo este proyecto implica una exploración profunda de un área de la ingeniería que resulta muy enriquecedora para mi formación como ingeniera. Es una gran oportunidad de trabajar en un laboratorio totalmente equipado para lo que necesite, y de estar en contacto con profesionales de los que aprender. Además, resulta gratificante poder desarrollar un proyecto útil sobre una tecnología que presenta un gran potencial y que se sitúa a la vanguardia con respecto al futuro de la fabricación.

1.2 OBJETIVOS

En base a la motivación del proyecto y al potencial de la tecnología FGF, se fijarán los siguientes objetivos:

- **Diseñar un sistema de impresión de pellets**
 - Adaptar una impresora de filamento para la extrusión de pellets.

- **Analizar el potencial de una impresora FGF de gran formato**
 - Se probará a imprimir con diferentes materiales termoplásticos, así como con materiales reciclados con el fin de sacar parámetros óptimos de impresión.
- **Evaluar el rendimiento del proyecto**
 - Se medirá calidad de impresión, coste de impresión y versatilidad de materiales tomando como referencia la tecnología de sistemas convencionales de FDM.

1.3 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

9. Industria, innovación e infraestructura.

En este caso, la innovación sería la impresión 3D por medio de la extrusión de pellets, que constituye una base para el futuro de la producción y fabricación de producto.

10. Producción y consumo responsables.

Como se ha mencionado anteriormente, el FGF tiene el potencial para reducir costes de producción y energéticos frente al FDM, contribuyendo a un consumo responsable.

13. Acción por el clima.

La impresión 3D con pellets facilita el uso de materiales reciclados para imprimir, favoreciendo la economía circular y haciendo más sostenible el proceso de impresión.



Producido en colaboración con TROLLBÄCK & COMPANY | TheGlobalSustainable.com | +34 926 206 1010
Para cualquier duda sobre la utilización, por favor comuníquese con: discom@trollback.com

Figura 7: Objetivos de desarrollo sostenible

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

Antes de realizar la adaptación de la impresora de filamento y evaluar distintos tipos de pellets en la impresora de gran formato, es importante analizar las diferentes tecnologías de impresión 3D de termoplásticos. Este análisis permite comprender las ventajas que ofrece la fabricación aditiva granular frente a otras alternativas, especialmente frente al FDM, con el que comparte el mismo principio de funcionamiento.

Además, se revisarán las diferentes opciones de sistemas de extrusión por pellets, los parámetros de impresión teóricos recomendados y los problemas más comunes durante el proceso de impresión con pellets.

Adicionalmente, se analizarán las características principales y los potenciales de reutilización de materiales termoplásticos comúnmente usados en la impresión 3D.

2.1 IMPRESORAS 3D EN EL MERCADO

Como hemos mencionado en la introducción, existe una extensa variedad de impresoras 3D. La elección entre una y otra puede depender de su aplicación, yendo desde la construcción de estructuras hasta el prototipado de piezas, o del material de impresión, que puede ser desde polvo termoplástico, hasta metales, resinas. La tecnología FGF funciona principalmente con material termoplástico, siendo el ABS y el PLA los materiales a evaluar en la parte experimental del trabajo.

De esta forma, se evaluarán las principales técnicas de impresión 3D de material termoplástico, entre ellas: Sinterizado Selectivo por Láser (SLS), Fusión por Chorro Múltiple (MJF), Fabricación por Laminación de Objetos (LOM), Modelado por Deposición Fundida (FDM) y Fabricación por Deposición de Material Granular (FGF).

2.1.1 SELECTIVE LASER SINTERING (SLS)

Es la tecnología de lecho de polvo plástico más consolidada. La literatura académica destaca su capacidad para fabricar geometrías complejas sin soportes, ya que el polvo no sinterizado actúa como lecho de apoyo. Además, las piezas producidas mediante la impresión 3D SLS tienen excelentes características mecánicas, con una resistencia similar a la de las piezas moldeadas por inyección.

Artículos técnicos señalan que el control de la potencia del láser y la temperatura de la cámara son críticos, donde pequeñas variaciones pueden causar deformación (*warping*) o porosidad. Por otro lado, la sostenibilidad es un tema recurrente en investigación de este tipo de impresión. La tasa de reutilización del polvo (*refresh rate*), busca equilibrar el costo y la integridad mecánica de la pieza final.

Funciona de la siguiente manera ^[9]:

1. Una vez cargamos el archivo g-code de la pieza, la impresora precalienta el polvo hasta alcanzar una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del material en bruto. El proceso funciona de forma que el láser actúa solo en zonas específicas del lecho de polvo, fundiendo las partículas de polvo para que se unan de forma mecánica, creando una pieza sólida. El polvo sin fundir sirve como soporte para la pieza durante la impresión. Este proceso se repite varias veces bajando la plataforma de impresión y alimentando con más polvo, hasta que la pieza esté completada.
2. Una vez terminada la impresión, la cámara debe enfriarse ligeramente dentro del recinto de impresión y después, fuera de la impresora, para evitar que se deformen las piezas y asegurar unas propiedades mecánicas óptimas.
3. Finalmente se retiran las piezas terminadas de la cámara de impresión, las separamos y limpiamos el exceso de polvo, pudiéndolo reciclar posteriormente.

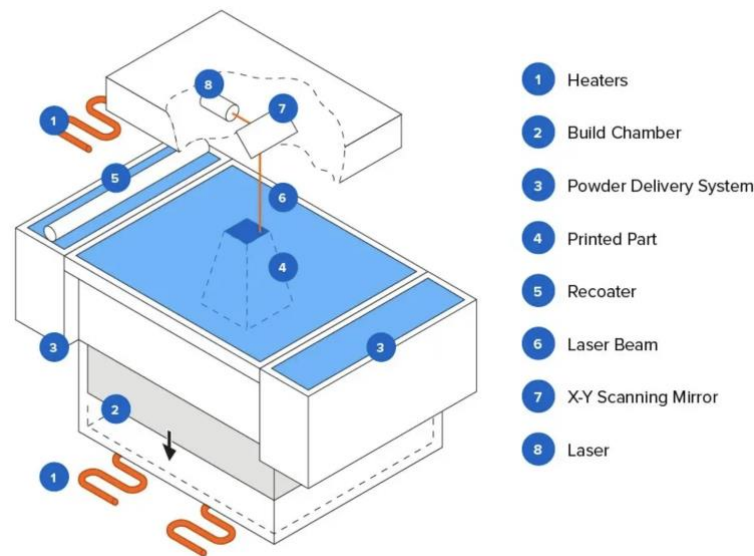


Figura 8: Esquema del funcionamiento del SLS [9]

2.1.2 MULTI JET FUSION (MJF)

Desarrollada por HP, la impresión por MJF se distingue por su velocidad y uniformidad térmica [8]. Según diversos estudios, esta tecnología utiliza un agente de detalle (*detailing agent*) que ayuda a definir los bordes con precisión microscópica.

Algunas investigaciones demuestran que las piezas de MJF presentan una isotropía superior a la del SLS, es decir, unas propiedades mecánicas similares en todos los ejes. Esto se debe a una cristalización más uniforme del polímero.

El proceso de impresión requiere la extensión de una capa de polvo sobre una plataforma, sobre la cual se aplica selectivamente un chorro de agentes de fusión y de detallado. Estos agentes son fluidos de base acuosa que contienen aditivos absorbentes o inhibidores de radiación infrarroja, y no constituyen el material estructural de la pieza final. Posteriormente, lámparas de radiación infrarroja funden y fusionan el polvo en las zonas donde se ha aplicado el agente de fusión. A continuación, la plataforma desciende la distancia correspondiente al

espesor de capa para extender una nueva capa de polvo, repitiéndose el proceso hasta completar las piezas requeridas. Finalmente, tras el enfriamiento del lecho de polvo, las piezas se retiran para su posterior limpieza.

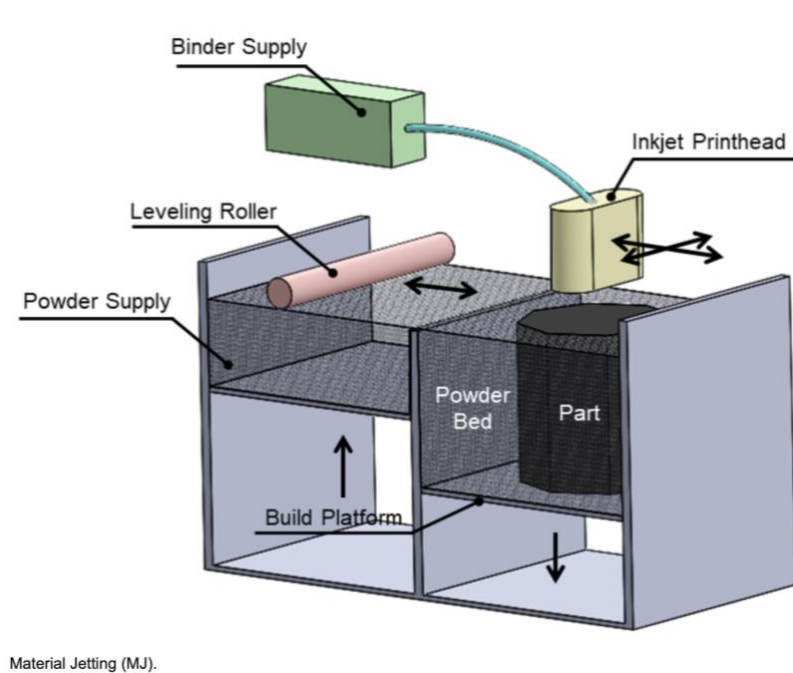


Figura 9: Esquema de la impresión por MJF^[8]

2.1.3 LAMINATING OBJECT MANUFACTURING (LOM)

Se trata de una técnica rápida y económica basada en la laminación de láminas mediante calor o adhesivos. Aunque en la actualidad es menos común que las técnicas de lecho de polvo, sigue utilizándose para la fabricación de prototipos de gran tamaño, por lo que la investigación se centra principalmente en la optimización del proceso para la fabricación de grandes estructuras ^[10].

Estudios sugieren que su principal ventaja es la baja distorsión térmica, ya que no hay un cambio de fase masivo (fusión total) como en el FDM, es decir, no hay tantos problemas de adhesión de capas. Sin embargo, presenta ciertas desventajas, como el desperdicio de

material (*scrap*) y la dificultad para extraer piezas con cavidades internas complejas, por lo que no se utiliza para piezas que requieran una gran precisión y detalle.

Se construyen piezas uniendo capas de láminas normalmente de papel, plástico o metal. El proceso funciona pegando una lámina del material sobre la anterior y recortando la forma querida con un láser o cuchilla. Este proceso se completa capa a capa hasta obtener la pieza final, sirviendo como soporte el material sobrante recortado, el cual es retirado manualmente al finalizar la pieza.

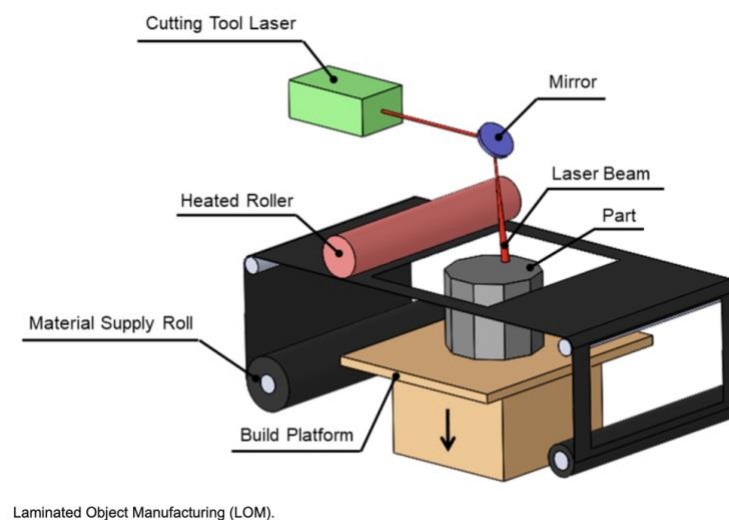


Figura 10: Esquema de impresión por LOM ^[10]

2.1.4 FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)

El FDM es la tecnología 3D más utilizada. La investigación actual se enfoca en la optimización de parámetros como el grosor de capa y la orientación de la pieza^[8], esto debido a que las piezas son más débiles en la unión de capas que en la dirección del filamento. De esta manera, factores como la temperatura de la cámara y la velocidad de enfriamiento son críticos para la "zona de soldadura" entre capas, donde diferentes artículos indican que la fuerza en el eje Z suele ser un 20-50% menor que en los ejes X-Y debido a una fusión incompleta del material.

Por otro lado, la investigación se centra en la evaluación y optimización de parámetros dependiendo del material de impresión, los cuales han evolucionado desde plásticos como el PLA o el ABS, a polímeros de alto rendimiento como el PEEK y PEI (Ultem). Estos últimos se utilizan para aplicaciones aeroespaciales debido a su alta resistencia térmica ^[21], por lo que requieren extrusores especializados capaces de soportar hasta 400°C.

El proceso de impresión es sencillo, el material convertido previamente a filamento avanza en el interior del extrusor con la ayuda de engranajes, este se calienta en la zona del *hotend*, que calienta el filamento a temperatura de fusión. Finalmente, el polímero fundido sale por la boquilla y es depositado sobre la cama caliente para formar el objeto.

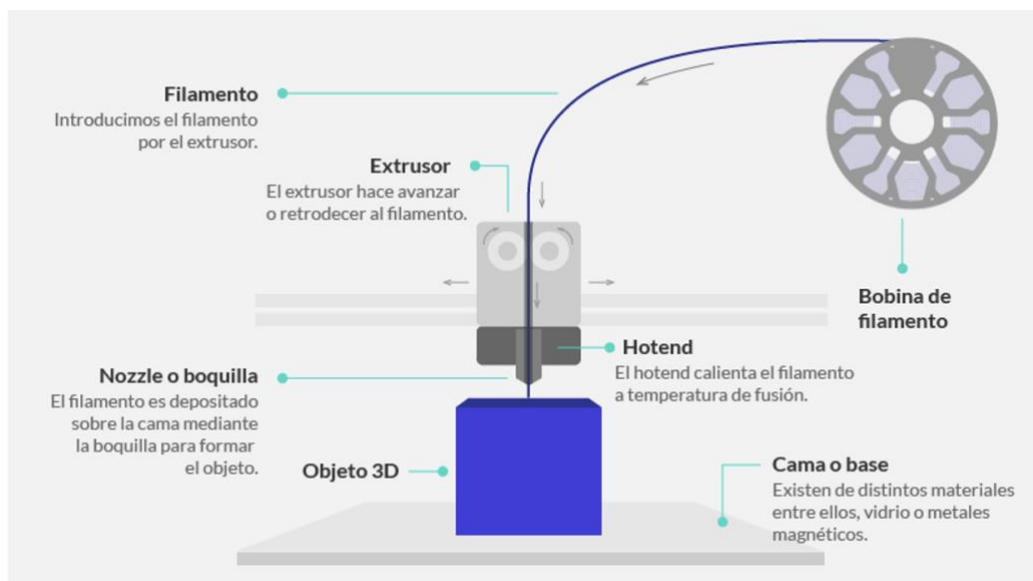


Figura 11: Esquema del funcionamiento del FDM

2.1.5 FUSED GRANULATE FABRICATION (FGF)

La impresión FGF o de extrusión directa de pellets representa un salto disruptivo hacia la fabricación de gran formato y bajo costo. Su principio de funcionamiento es igual al del

FDM pero en vez de extruir filamento, utiliza los gránulos del material como materia prima, según la lectura, reduciendo los costes operativos entre un 60% y un 90% ^[17]. Además, la fabricación de filamento puede llegar a degradar térmicamente el polímero, por lo que al extruir directamente con pellets se evita perder propiedades del material virgen.

Por otro lado, los sistemas FGF permiten tasas de deposición mucho más altas (de kg/h en lugar de g/h). De esta manera, artículos especializados destacan su uso en la creación de moldes para la industria naval y arquitectónica ^[14].

Aún con todas estas ventajas, esta tecnología también presenta algunos desafíos técnicos que hace de la implementación de tecnología FGF más compleja a otras. El reto principal está en el control de la presión en la boquilla. Esto se debe a que el efecto de "*retract*" (detención del flujo) es más complicado de obtener en un sistema de extrusión de pellets que de filamento, debido a la inercia del tornillo sinfín, lo que a menudo requiere post-procesado (mecanizado CNC) para obtener acabados precisos. Se profundizará sobre este concepto más adelante, en el apartado 2.2.2 *Influencia de la inercia en el proceso de extrusión*.

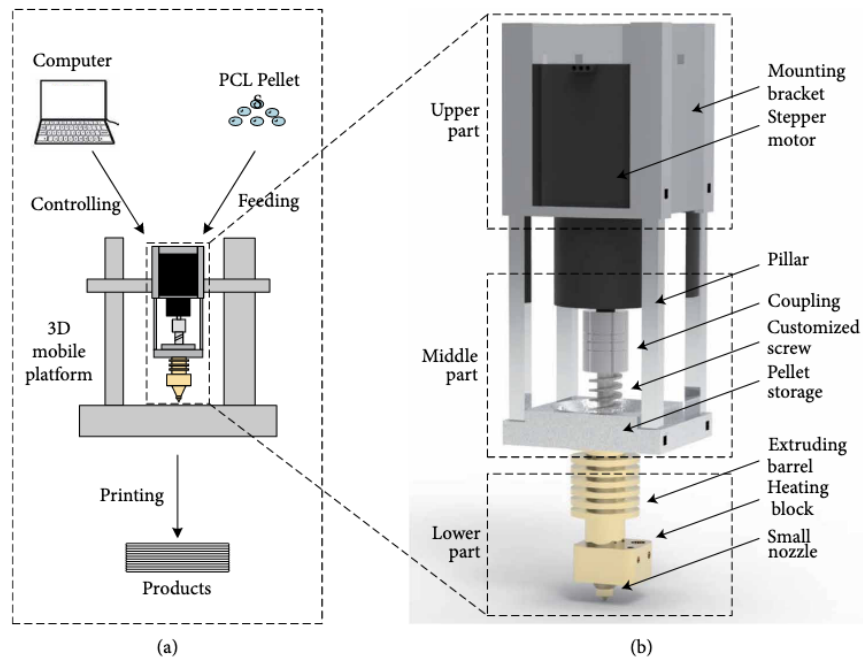


Figura 12:(a) Diagrama de flujo del sistema (b) Detalle de la impresora dividido en tres partes^[16]

2.2 COMPARACIÓN ENTRE FDM Y FGF

Habiendo hecho un estudio de las diferentes tecnologías de material termoplástico en el mercado, se toma como referencia a la impresión por FDM para evaluar el potencial del FGF. El motivo de esta decisión es que ambas tecnologías son muy similares, siendo la impresión con pellets una evolución directa de la de filamento. En estos sistemas se tiene material en forma de pellets, los cuales se funden y procesan para fabricar el filamento que sirve como materia prima para imprimir. Como se ha mencionado anteriormente, el FGF permite saltarse la conversión de los pellets a filamento, extruyendo directamente los pellets fundidos. Como punto de partida y según la lectura, se realizó una comparativa preliminar de las dos tecnologías:

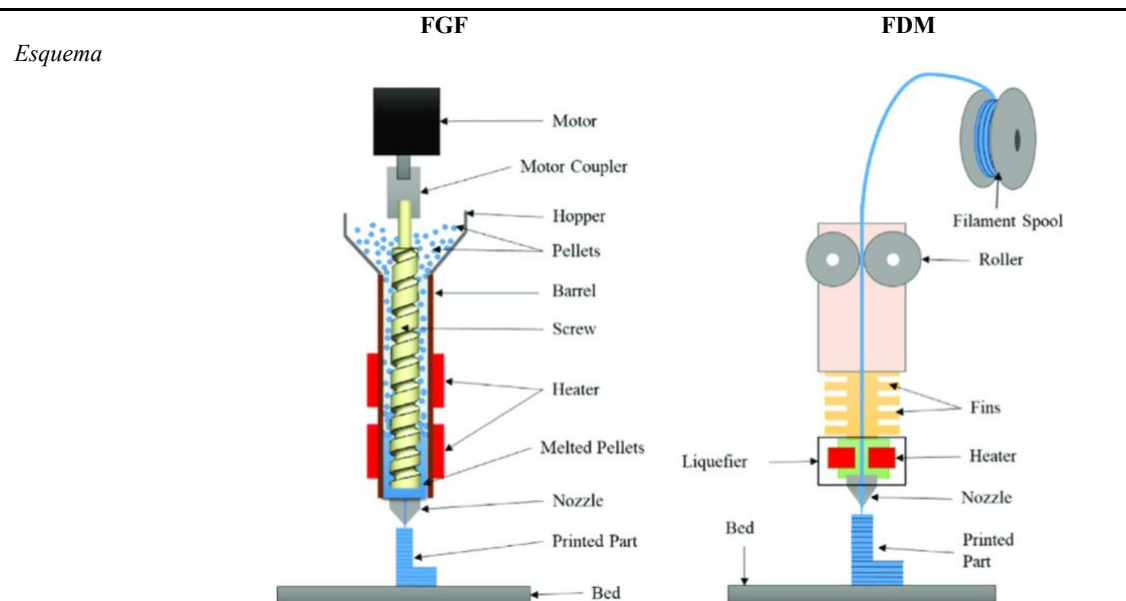


Figura 2: Esquemas de extrusora de pellets y de FDM^[16]

<i>Reciclaje de material</i>	La configuración del extrusor permite mezclar materiales o añadir aditivos como fibra de carbono o vidrio para mejorar propiedades mecánicas. También permite mezclas de material con restos reciclados de piezas defectuosas.	La mezcla consiste en alternar dos tipos de filamento de diferente material. No permite la reutilización de material proveniente de piezas defectuosas.
<i>Propiedades del material</i>	Las piezas conservan las propiedades del material original	El material puede perder ciertas propiedades al pasar por el proceso de fabricación del filamento
<i>Detención del flujo (retract)</i>	Menos control de presión en la boquilla, retract complejo	Control fácil y retract sencillo
<i>Precisión</i>	Menos precisión en las piezas	Buena precisión
<i>Tiempo</i>	Disminución de tiempo de impresión, tasa de producción en kg/h	Tiempo de impresión alto, tasa de producción en g/h
<i>Costes</i>	Costes más bajos de materia prima pero primera inversión alta	Coste operativo más alto debido a la necesidad de preparación del filamento

Tabla 3: Comparativa de Impresión 3D FGF y FDM

2.3 VENTAJAS DE IMPRESIÓN FGF

Una vez visto las diferentes tecnologías de fabricación aditiva, podemos decir que la fabricación mediante extrusión de pellets (FGF) presenta un alto potencial de crecimiento,

así como varias ventajas clave frente a otros tipos de impresión 3D como FDM, SLS o MJF. Entre ellas, se encuentran:

- Frente al **FDM**, se ha visto que el empleo de pellets en lugar del filamento supone una reducción significativa del coste del material, se evita el proceso intermedio de extrusión, que puede degradar térmicamente al polímero. Además, el FGF permite mayores tasas de deposición, reduciendo los tiempos de fabricación, notablemente perceptibles en las piezas de gran formato.
- Frente a **tecnologías de lecho de polvo como SLS y MJF**, la impresión con pellets presenta un menor coste de inversión inicial y de operación, al no requerir control de la cámara ni de sistemas láser de alta precisión, ofreciendo un proceso más simple. A cambio se reduce la resolución y propiedades mecánicas más homogéneas, menos relevantes para según qué aplicaciones, como aquellas en las que prima el tamaño, coste y velocidad sobre el acabado superficial.
- Frente al **LOM**, el FGF permite la fabricación de geometrías más complejas y polímeros homogéneos, evitando problemas asociados a la laminación, como la anisotropía entre capas o la eliminación de material sobrante.
- Asimismo, el FGF ofrece una **alta versatilidad en cuanto a materiales** utilizables, así como de alta compatibilidad con materiales reciclados, facilitando la implementación de estrategias de economía circular y sostenibilidad.
- También destaca por su **alta escalabilidad**, siendo especialmente adecuada para piezas de gran volumen, moldes, aplicaciones estructurales, cuando otras tecnologías presentan limitaciones de volumen de trabajo o costes demasiado altos.

No obstante, estas ventajas vienen acompañadas de desafíos técnicos, como el control preciso del flujo de material, dificultad de retracción y menor calidad superficial. Por estos motivos resulta conveniente una investigación más profunda de esta tecnología para optimizar su implementación en sistemas de bajo coste.

2.4 ¿CÓMO FUNCIONA LA IMPRESIÓN CON PELLETS?

2.4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO INTERNO DE EXTRUSIÓN

Como se ha introducido en apartados anteriores, la tecnología de impresión 3D mediante pellets se basa en el empleo de una extrusora de husillo en lugar del sistema convencional de filamento. Aunque ambos procesos comparten el principio de deposición de material fundido capa a capa, existen diferencias significativas en su funcionamiento interno.

El proceso comienza con la alimentación del material en forma de pellets a través de una tolva, desde la cual descienden por gravedad hacia el interior del sistema de extrusión. El elemento fundamental de este sistema es el husillo (tornillo sinfín), que gira en el interior de un cilindro calefactado. Este componente desempeña simultáneamente funciones de transporte, compresión y fusión del material polimérico.

A lo largo del husillo, el material atraviesa diferentes zonas funcionales. En primer lugar, en la zona de alimentación, los pellets se encuentran en estado sólido y son transportados de manera controlada hacia las regiones posteriores. A continuación, en la zona de compresión, la geometría del husillo reduce progresivamente el volumen disponible, incrementando la presión sobre el material y favoreciendo su compactación y transferencia térmica. Finalmente, en la zona de dosificación, el polímero se encuentra completamente fundido y se homogeniza, generando un flujo continuo y uniforme.

El aporte térmico necesario para la fusión del material proviene tanto de resistencias eléctricas externas como del calor generado por fricción interna (cizallamiento) entre el material y las superficies del sistema. Este fenómeno contribuye de manera relevante al proceso de plastificación del material a lo largo del extrusor, justo antes de salir por la boquilla. De esta forma, el polímero fundido se deposita controladamente siguiendo la trayectoria definida por el sistema de impresión, permitiendo la construcción aditiva de la pieza.

2.4.2 INFLUENCIA DE LA INERCIA EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN

Desde el punto de vista físico, una de las principales diferencias entre la extrusión de pellets y la extrusión de filamento radica en la mayor inercia del sistema. Esta característica constituye uno de los retos principales de la impresión con pellets, y se debe a varios factores inherentes a su diseño y funcionamiento.

Por un lado, existe una mayor masa de material en proceso dentro del extrusor, incluyendo tanto material sólido como parcialmente fundido y completamente fundido. Por otro, el uso de un husillo genera un flujo continuo de material el cuál no se detiene instantáneamente, algo que sí se consigue de forma más sencilla en un sistema de filamento, donde se utiliza la retracción para evitar goteos o hilos (*stringing*), que consiste en tirar ligeramente del filamento hacia atrás.

Como consecuencia, el sistema de pellets presenta una respuesta más lenta ante cambios en las condiciones de operación, tales como variaciones en la velocidad de extrusión o la interrupción del flujo. Es decir, al detener el proceso de deposición, el material continúa fluyendo durante un breve intervalo debido a la presión interna acumulada. De manera similar, los cambios en el caudal requieren un cierto tiempo de estabilización. En términos generales, este comportamiento confiere al sistema una dinámica más gradual y menos reactiva en comparación con la extrusión de filamento.

De esta forma, la mayor inercia del sistema tiene implicaciones directas en el proceso de impresión. Por un lado, requiere una calibración más precisa de los parámetros de control, especialmente en lo relativo a la regulación del caudal y las estrategias de retracción. Por otro lado, puede limitar la precisión en la fabricación de detalles finos. Sin embargo, esta misma característica permite alcanzar tasas de deposición significativamente superiores, lo que resulta especialmente ventajoso en la fabricación de piezas de gran volumen.

2.4.3 LIMITACIONES DE LA IMPRESIÓN FGF

Las impresoras FGF presentan grandes ventajas, sin embargo, existen ciertas limitaciones que hay que tener en cuenta:

- El tamaño de las piezas. Como hemos visto, el tamaño más pequeño que existe para la impresora de PioCreat G5 Ultra es de 0,8mm, por lo que no se podrían hacer piezas con detalles pequeños con buena precisión. De todas formas, la idea es aprovechar el gran formato de la impresora para hacer piezas más grandes. El límite superior de esta pieza sería el indicado en las especificaciones de la impresora, de 500x500x400mm.
- Geometrías especiales. La precisión puede verse afectada al hacer geometrías muy complejas, sobre todo en el caso de ser de una precisión mayor a 0,8mm. En este caso será esencial la buena elección de colocación de la pieza a imprimir y de algunos parámetros como la tasa de deposición y de flujo.
- Control del flujo de material y dificultad de retracción. Como se ha comentado, la calidad de las piezas, sobre todo en la superficie de una impresora de pellets puede no ser tan buena, habiendo una falta de precisión causada por una falta de precisión en el control del flujo del material y de dificultad de retracción. Con el fin de evitar esto, es necesario afinar mucho los parámetros de impresión. Más adelante, en *2.5 Parámetros críticos para el diseño de impresoras 3D*, se explicarán y verán más en profundidad estos dos conceptos de impresión.

2.4.4 SISTEMAS DE EXTRUSIÓN DE PELLETS

Una parte fundamental de las impresoras FGF es la extrusora de pellets, que se encarga de la fundición, transporte y deposición del material. A diferencia del FDM, también realiza la función de la fusionar progresivamente el polímero y de generar la presión suficiente para obtener un flujo de salida continuo y homogéneo. De este modo, el extrusor introduce en el sistema de impresión nuevas variables como la presión interna, el retardo entre la salida y

entrada del material, la inercia térmica del sistema y la velocidad del husillo, que dificulta el control del flujo del material. De esta forma, la velocidad y temperatura del husillo determina de manera no lineal el caudal de extrusión, lo que introduce complejidad al proceso.

Se compone de una tolva (hopper), por donde se alimenta el material, un husillo o tornillo, un barril calefactado y una boquilla, así como de un motor que realiza el movimiento giratorio del tornillo. El husillo se divide, a su vez, en tres zonas:

- zona de alimentación de pellets.
- zona de transición o compresión, para eliminar el aire y se comienza a calentar y fundir el material.
- zona de medición, que se encarga del aumento de presión y la estabilización del flujo de salida.

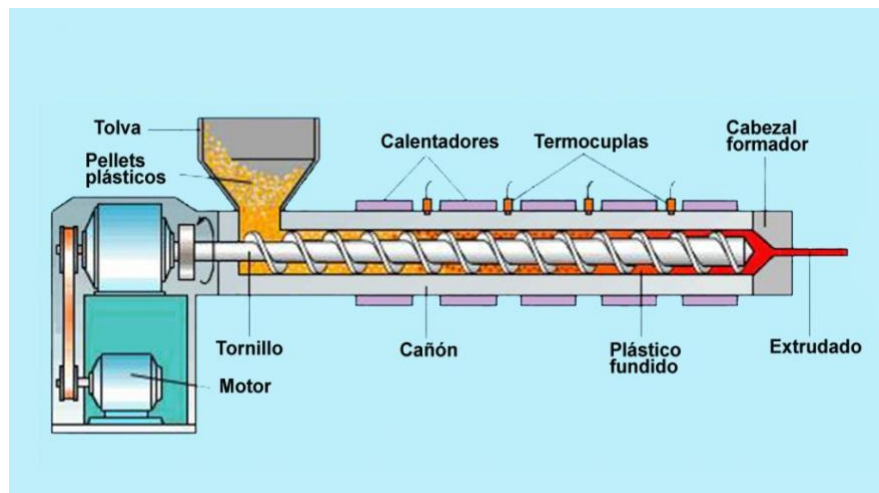


Figura 13: Esquema de las partes de un extrusor de pellets

Los sistemas de extrusión más comunes son:

- Extrusor de tornillo simple (single-screw). Emplean un único tornillo rotativo y tienen un diseño relativamente simple permitiendo altos caudales de material que les convierte en los más utilizados en la fabricación aditiva. Sin embargo, presentan algunas limitaciones en cuanto al control del flujo a la dificultad de retracción, sobre todo en transiciones rápidas, debido a la inercia del material fundido.

- Extrusores de doble tornillo (twin-screw). Se utilizan dos tornillos que giran de manera coordinada con el fin de obtener una mezcla homogénea, especialmente con materiales compuestos o reciclados, así como un mejor control del proceso. No obstante, tanto la complejidad como el coste es más elevado.

Es por todo lo expuesto anteriormente que el diseño y control del extrusor resulta determinante para el correcto funcionamiento del sistema, siendo su elección y control fundamental para la implementación de esta tecnología. En el caso de este trabajo, tanto la impresora comercial como la de escritorio utiliza un extrusor de tornillo simple.

2.5 PARÁMETROS CRÍTICOS PARA EL DISEÑO DE IMPRESORAS 3D FGF

Para el diseño de una impresora 3D, existen ciertos parámetros a los que se debe prestar especial atención, como la velocidad del motor paso a paso, la velocidad de desplazamiento de la boquilla y la altura entre esta y la plataforma.

Según el artículo publicado por Hindawi ^[11], estos parámetros son determinantes en el diámetro de las fibras extruidas y, en consecuencia, en la calidad final de las piezas obtenidas. Mediante un diseño experimental ortogonal (L9(3⁴)), los autores identificaron que la velocidad del motor paso a paso tiene la mayor influencia sobre el diámetro de las fibras, seguida por la velocidad de la boquilla y, en menor grado, la altura de la boquilla respecto a la plataforma.

Además, observaron que combinaciones inadecuadas de estos factores pueden originar defectos como huecos, deformaciones o una superficie irregular, mientras que la combinación óptima (una velocidad del motor de 1.256 mm³/s, una velocidad de

desplazamiento de la boquilla de 9.6 mm/s y una altura de 1.1 mm), permitió obtener piezas con mayor uniformidad dimensional y mejor acabado superficial.

2.5.1 ZONAS DE EXTRUSIÓN

Otro aspecto relevante en los sistemas de impresión 3D FGF es la posibilidad de definir múltiples zonas de calentamiento a lo largo del sistema de extrusión. Este tipo de configuración resulta especialmente beneficiosa en extrusores de alta tasa de flujo de material como los empleados en impresoras de gran formato. Este es el caso de la impresora PioCreat G5 Ultra, utilizada en el proyecto.

La incorporación de una zona de precalentamiento previa a la extrusión permite transferir de forma más eficiente la energía térmica necesaria al polímero, facilitando la reducción de su viscosidad antes de la salida por la boquilla. Esta disminución de viscosidad no solo mejora la calidad del proceso de impresión, sino que también reduce el par requerido por el motor del extrusor, minimizando el desgaste mecánico y permitiendo mayores velocidades de alimentación y purgado.

Además, la existencia de múltiples zonas térmicas posibilita la definición de perfiles de temperatura más ajustados al comportamiento de cada material. Algunos polímeros generan un mayor calentamiento por cizalladura durante el transporte y la dosificación dentro del husillo, lo que puede dar lugar a sobrecalentamientos locales y degradación del material si no se controla adecuadamente.

En este sentido, la aplicación de un gradiente térmico descendente^[15], con temperaturas más elevadas en la zona de entrada para favorecer la fusión y mezcla temprana de los pellets, y temperaturas más bajas en la zona de la boquilla, permitiría optimizar el caudal de material al tiempo que se reduce el riesgo de degradación térmica en la sección de dosificación, según la lectura.

Sin embargo, en algunos sistemas FGF, como el de la impresora que utilizamos, es normal emplear un perfil térmico ascendente, donde la temperatura es menor en la zona superior del extrusor mientras que la temperatura aumenta progresivamente hacia la salida del material. Esto permite al polímero ir alcanzando la temperatura de fusión de forma controlada e ir aumentando de manera progresiva hacia la salida. Con esto se reduce el riesgo de degradación prematura y se asegura una viscosidad suficientemente baja en la boquilla para la deposición del material y correcta adhesión entre capas.

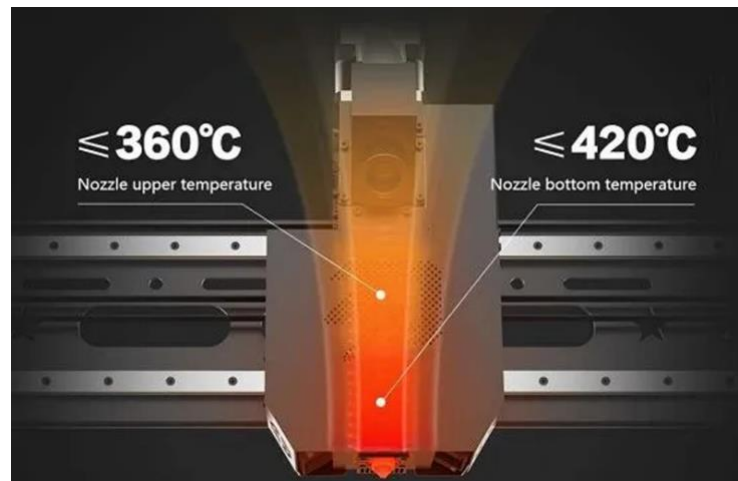


Figura 14: Zonas de calor segmentadas de la impresora PioCreat G5 Ultra ^[2]

En principio, se utilizaría una temperatura más alta en la zona de salida cuando se trabaja con materiales de alta viscosidad (como el ABS, PET y PETG) o elevada tasa de deposición para garantizar la estabilidad y continuidad del flujo.

En este contexto, el control independiente de las zonas térmicas permite compensar las diferencias en el calentamiento por cizalladura que experimentan distintos polímeros durante su transporte dentro del extrusor. Además, la posibilidad de definir el perfil térmico ofrece una alternativa más flexible y sostenible que la modificación de la geometría del husillo o de la relación de compresión de cada material, sin necesidad de sustituir componentes mecánicos, incrementando la versatilidad del sistema y reduciendo costes de operación.

2.5.2 BOQUILLAS DE IMPRESIÓN

Las impresoras 3D de gran formato FGF presentan ventajas significativas en la producción de componentes de gran tamaño, especialmente cuando se requiere una elevada tasa de deposición de material. Una de las principales características que permiten este tipo de fabricación es la posibilidad de trabajar con boquillas de gran diámetro, comprendidas entre 1 y 2 mm, lo que se traduce en caudales máxicos elevados y, en consecuencia, en una reducción sustancial de los tiempos de impresión para piezas de gran volumen^[15].

El uso de boquillas de gran tamaño resulta especialmente adecuado para la fabricación de componentes funcionales en los que la calidad superficial no constituye un requisito crítico. En este tipo de aplicaciones, la prioridad se centra en la rapidez de fabricación, la robustez estructural y la eficiencia del proceso, aspectos en los que los sistemas FGF con boquillas de gran diámetro ofrecen un rendimiento claramente superior frente a tecnologías de deposición con boquillas de menor tamaño.

Por otro lado, la disponibilidad de múltiples boquillas o la posibilidad de intercambiar boquillas de distinto diámetro amplía la versatilidad del sistema, permitiendo adaptar el proceso de impresión a los requisitos específicos de cada aplicación. Este enfoque resulta especialmente interesante en sectores donde se demandan piezas personalizadas o de gran escala, como la fabricación de mobiliario a medida, equipamiento deportivo, utillaje y herramientas de investigación, productos sanitarios de gran volumen, componentes para maquinaria agrícola, elementos constructivos, así como útiles y fijaciones fabricadas bajo demanda para entornos industriales.

En conjunto, la combinación de sistemas FGF de gran formato con boquillas de gran diámetro permite abordar aplicaciones industriales que difícilmente podrían ser cubiertas por tecnologías de impresión 3D convencionales, posicionando esta tecnología como una alternativa viable para la fabricación rápida y eficiente de componentes de gran tamaño y funcionalidad elevada.

2.5.3 CONTROL DEL FLUJO DE MATERIAL Y RETRACCIÓN

Como ya se ha comentado anteriormente, la tecnología FGF presenta dificultad para el control del flujo, a diferencia del filamento, los pellets fundidos no permiten una tracción mecánica directa hacia atrás debido a la propia naturaleza del sistema de extrusión por husillo, lo que provoca dificultad de retracción.

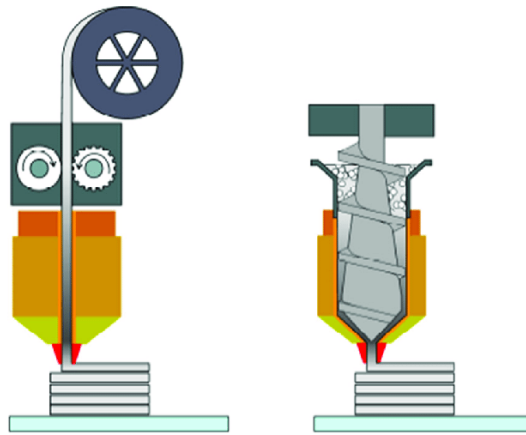


Figura 15: Esquema del interior de un extrusor de filamento y de pellets

La principal causa de estos problemas de retracción es debida a la presión interna elevada. Al detener el giro del husillo, el material fundido sigue saliendo por la boquilla debido a la gravedad y a la descompresión que sufre a la salida de la boquilla, lo que provoca hilos o goteo, un efecto conocido como *stringing*. En este caso lo único que se puede hacer es invertir el giro del husillo para aliviar la presión, sin embargo, esto puede no ser suficiente y no suele vaciar la boquilla por completo.

Por tanto, el control del flujo suele ser una tarea delicada, y es fácil que surjan variaciones en la tasa de extrusión, conocido como *surging*, afectando a la precisión dimensional.

Con el fin de mitigar estos efectos, se hace una calibración del flujo volumétrico, esto significa que se ajusta el flujo basándose en el volumen real del material que el extrusor puede procesar por segundo evitando así la sobreextrusión o subextrusión.

También se tiene que prestar especial cuidado a la temperatura, eligiendo la mínima necesaria para fundir el polímero ya que, si este está demasiado líquido, será imposible controlar el *stringing*.

Será necesario ajustar la velocidad de retracción lo más rápida posible, pero evitando vacío o burbujas de aire que puedan surgir al retomar la extrusión. Por otro lado, tras una pausa en la extrusión es necesario reestablecer la presión con una fase de purga o *priming*, tras hacer una pausa, es recomendable que sea más baja con el fin de elevar la presión de manera progresiva y evitar sobreesfuerzos del motor, así como un flujo más estable.

Además, se puede hacer uso de *coasting* y *wipe* (limpieza), que consiste en configurar en el laminador el *coasting*, es decir, la detención de la extrusión antes de terminar el perímetro, usando la presión residual para completar la línea, y el *wipe* para descargar el material sobrante sobre la pieza. De esta forma, se evitan acumulaciones en las partes más críticas de la pieza al terminar la extrusión.

2.6 MATERIALES PARA IMPRESIÓN 3D

Como hemos mencionado anteriormente, en la actualidad se desarrollan diferentes tipos de impresoras 3D para extruir con diferentes materiales. En este proyecto se trabajará con material termoplástico, cuya capacidad de ablandarse al calentarse, permite moldearlos repetidamente y endurecerse al enfriarse. Esta propiedad los hace fácilmente reciclables mediante fusión y moldeo, son versátiles en su aplicación (inyección, extrusión, soplado), y ofrecen propiedades como resistencia al impacto y a la corrosión química.

Se quiere también trabajar con material reciclable^[17]. Por el momento se tienen a disposición del proyecto pellets de redes de pescar, hechos de fibras sintéticas como el nailon y el

polietileno, así como de material PET, utilizado comúnmente en botellas de plástico, y de PETG, para piezas que requieren una mayor resistencia.

En el cuadro de trabajo, también se plantea trabajar con mezclas de material reciclado, con el objetivo de evaluar la viabilidad de obtener piezas impresas de manera más sostenible en el futuro. Una de las grandes ventajas de las impresoras de pellets reside en la posibilidad del uso del material directamente, que no solo hace posible saltarse la etapa de fabricación del filamento, sino que también habilita la reutilización del material reduciendo así el impacto ambiental del proceso. No obstante, resulta fundamental garantizar que las piezas obtenidas mantengan una calidad adecuada y cumplan los requisitos mecánicos y funcionales exigidos por su aplicación final.

El procedimiento propuesto consiste triturar piezas de pellets defectuosas y mezclar esto con el mismo polímero en forma de pellet virgen. De esta manera se asegura un flujo constante y se minimizan los posibles problemas de alimentación. Asimismo, se ajustarán los parámetros de impresión con el fin de alcanzar la mayor proporción de material reciclado posible, sin comprometer la calidad de la pieza final.

Por otro lado, debe tenerse en cuenta que los polímeros termoplásticos sufren una degradación progresiva de sus propiedades mecánicas cada vez que son sometidos a ciclos de calentamiento y extrusión^[17]. Diversos estudios han demostrado que esta degradación limita el número de ciclos de reciclado a valores reducidos, habitualmente en torno a cinco, si no se recurre a la adición de material virgen o a refuerzos que compensen la pérdida de prestaciones mecánicas. Este comportamiento se asocia principalmente a la rotura de las cadenas poliméricas y a procesos de degradación térmica y oxidativa.

En este contexto, la fabricación aditiva mediante fusión directa de partículas (FGF) se presenta como una alternativa para reducir el número de ciclos térmicos a los que se somete

el material reciclado. Al imprimir directamente a partir de pellets, material triturado o escamas, se elimina la etapa de extrusión previa necesaria para la obtención de filamento, lo que contribuye a preservar en mayor medida las propiedades del polímero.

Esta tecnología ha sido desarrollada y validada tanto en el ámbito académico como en sistemas comerciales, principalmente con material virgen. No obstante, la influencia del uso de polímeros reciclados, con diferentes morfologías y tamaños de partícula, sobre las propiedades mecánicas de las piezas obtenidas mediante FGF aún no ha sido ampliamente caracterizada. Esta falta de información limita actualmente la fabricación de componentes sometidos a carga estructural a partir de residuos plásticos reciclados mediante este tipo de impresión 3D.

2.6.1 DIFERENCIA ENTRE MATERIAL RECICLADO Y RECICLABLE

Los conceptos de material reciclable y material reciclado hacen referencia a etapas distintas dentro del ciclo de vida de los materiales y tienen implicaciones técnicas, ambientales y económicas diferentes.

Se denomina material reciclable a aquel material que, por su naturaleza, composición y propiedades, puede ser recuperado y sometido a un proceso de reciclaje al final de su vida útil. Esto implica que el material es técnicamente apto para ser recogido, separado y reprocesado, aunque ello no garantiza que dicho proceso se lleve a cabo efectivamente. La reciclabilidad de un material depende tanto de sus características intrínsecas (tipo de polímero, aditivos, compatibilidad con otros materiales) como de la existencia de infraestructuras y tecnologías de reciclaje adecuadas.

Por otro lado, el material reciclado es aquel que ya ha sido sometido a uno o varios procesos de recuperación y reprocesado, y que se reincorpora al ciclo productivo como materia prima secundaria. En este caso, el material ha pasado por etapas como la recogida, clasificación,

trituration y limpieza, y se ha vuelto extruir. Como consecuencia de estos procesos, especialmente de los ciclos térmicos repetidos, el material reciclado puede presentar una degradación parcial de sus propiedades mecánicas, térmicas o reológicas (comportamientos de deformación bajo la acción de una fuerza) en comparación con el material virgen^[17]. Según la lectura, las virutas trituradas de piezas 3D fallidas se deben mezclar con pellets en una proporción de 30% virutas y 70% pellets para evitar problemas al imprimir y mantener un flujo estable de impresión.

Desde un punto de vista ambiental, ambos conceptos desempeñan un papel relevante, pero con implicaciones distintas. El uso de materiales reciclables favorece el diseño de productos alineados con los principios de la economía circular, mientras que el uso de materiales reciclados contribuye directamente a la reducción del consumo de materias primas vírgenes y a la disminución de residuos. Sin embargo, la incorporación de material reciclado en procesos industriales suele requerir ajustes en las condiciones de procesado o la mezcla con material virgen para garantizar el cumplimiento de los requisitos técnicos del producto final.

En el contexto de la fabricación aditiva, y en particular en tecnologías como la impresión 3D con pellets, esta distinción resulta especialmente relevante. Mientras que muchos polímeros empleados son reciclables, el comportamiento del material reciclado durante la extrusión y la deposición puede diferir significativamente, afectando a la estabilidad del proceso y a las propiedades finales de las piezas impresas. Por ello, resulta fundamental evaluar de forma diferenciada la reciclabilidad del material y el impacto real del uso de material reciclado en aplicaciones específicas.

2.6.2 MEZCLA DE MATERIALES

Se mezclaron algunos materiales, con el fin de no tener problemas de impresión estos debían de tener en común algunos aspectos como la temperatura de fusión en común, es decir, en este caso no sería posible mezclar PLA con ABS, ya que al tener diferentes propiedades

resultaría en una mala impresión y seguramente se terminaría deformando o incluso fracturando. Por tanto, la idea es mezclar estos los polímeros con aditivos que permiten imprimir adecuadamente, como por ejemplo ABS con fibras de carbono: ABS CF. Esta mezcla y muchas otras se encuentran en venta actualmente en páginas como Amazon, Filament2Print y Smart Materials.

Los aditivos permiten modificar las propiedades de la pieza para adecuar las propiedades del material original^[26] a una aplicación específica. De esta forma se obtiene:

- Resistencia y flexibilidad: se mejoran las propiedades termomecánicas de los polímeros al mezclarse con fibra de carbono o vidrio.
- Tolerancia a los rayos UV: con el fin de evitar la degradación rápida del plástico, el material se mezcla con compuestos que protegen de la radiación ultravioleta como el negro de carbón, que se le suele añadir al PP para ralentizar su degradación o el ASA, formulado para resistir a la luz solar y el clima.
- Aditivos de seguridad alimentaria: para aquellos plásticos destinados a entrar en contacto con alimentos sean seguros.
- Características antimicrobianas: del mismo modo que lo anterior, los plásticos destinados a la medicina deben tener propiedades que inhiban el crecimiento de gérmenes en la superficie del plástico.
- Ignífugos: para aquellas aplicaciones que necesiten estar protegidas del fuego (como en automóviles o en la industria aeroespacial), se enriquecen polímeros con sustancias que impiden la propagación del fuego.
- Magnéticos: existe la posibilidad de mezclar gránulos de polímero con pellets detectables mecánicamente para conseguir uno detectable magnéticamente.
- Protección contra la descarga electrostática (ESD): para prevenir daños a componentes electrónicos.
- Color: hay colorantes que se mezclan con polímeros con el fin de imprimir piezas de un color uniforme. Esto es especialmente útil cuando se recicla algún material ya que lo normal es tener restos de distintos colores.

Pellets con estas características están actualmente a la venta gracias a empresas profesionales que se especializan en la mezcla de materiales. Lo hacen con ayuda de equipos como amasadores, tornillos gemelos y mezcladores para garantizar una composición e integración adecuada de polímeros y aditivos. El resultado del proceso son pellets listos para ser utilizados en impresoras 3D de FGF como la del proyecto.

Capítulo 3. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

3.1 JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo principal ahondar en el proceso de impresión 3D con pellets analizando sus posibilidades y funcionalidad. Como hemos visto, el método de impresión 3D que lidera el mercado es el FDM, sin embargo, el FGF ofrece ventajas de ahorro de costes entre otras, al saltarse el paso de fabricación de filamento. También supone una reducción del impacto ambiental, no solo por el ahorro energético, si no por la posibilidad de reciclar materiales para imprimir, sin perder propiedades y aprovechando restos de material y de piezas defectuosas. De esta manera, se toma como referencia a piezas fabricadas con filamento para evaluar a aquellas impresas con pellets.

Asimismo, al haber significativamente menos información sobre las particularidades de los sistemas 3D FGF, se quiere realizar pruebas con una impresora de pellets con el fin de determinar, de manera experimental, parámetros óptimos de impresión. Una impresora de FGF, a diferencia del FDM, suele tener dos zonas de calentamiento, esto permite modificar las propiedades del material a gusto con el fin de obtener un resultado más resistente. Adicionalmente, en el estado del arte se indicó cómo el tipo de polímero afecta a los valores elegidos para estas dos zonas, pudiendo tener, teóricamente, un perfil térmico creciente o decreciente óptimo en función del material de impresión.

Adicionalmente, se planteó la adaptación de una impresora FDM de escritorio para trabajar con pellets por varias razones. Por un lado, se buscaba comprender en profundidad esta tecnología y su funcionamiento. Por otro, se pretendía demostrar las ventajas que puede ofrecer la adaptación de una impresora convencional para la impresión con pellets, permitiendo reducir costes mediante la transición del uso de filamento a granza, sin

necesidad de sustituir completamente la impresora original, sino aprovechando gran parte de los componentes y recursos ya disponibles. Para ello se ha hecho hincapié en la elección del extrusor, las diferencias en la programación y la adición de otros componentes a ella. El hecho de hacer uno mismo su impresora ayuda a entender de primera mano su modo de operar y, por tanto, a identificar los puntos fuertes y débiles de este tipo de impresión.

3.2 DIMENSIÓN Y CONTRIBUCIONES DEL TRABAJO

El trabajo se dividirá en dos partes bien diferenciadas:

- Por un lado, se construirá y adaptará la impresora de FDM del laboratorio de fabricación de ICAI a impresión con pellets. Se trata de una impresora de uso doméstico de formato mediano, en el que se cambiará el extrusor a uno de pellets y se modificará el firmware de la misma, adaptando parámetros como número de pasos del extrusor o velocidad de extrusión. También se añadirá un menú donde poder elegir entre impresión por filamento o por pellets, según la preferencia del usuario.

- Por otro lado, se harán varios experimentos con materiales como el PLA o el ABS, en una impresora de gran formato únicamente de pellets, la PioCreat G5Ultra. El objetivo es la obtención de parámetros preliminares de impresión. El alcance de estos ensayos lo determinará principalmente el tiempo de duración del proyecto, y la disponibilidad de los recursos del laboratorio.

Capítulo 4. METODOLOGÍA

El procedimiento para este trabajo consiste en un primer estado del arte, comparando la extrusión de pellets con otras tecnologías clave. Luego, existen dos ramas a desarrollar en el trabajo. Por un lado, se quiere adaptar una impresora de escritorio de FDM para que imprima con pellets. Para ello, se investigarán tres tipos de extrusores de pellets y las condiciones de una impresora 3D de este tipo con el fin de pasar al diseño y construcción.

De esta manera, se dedicarán varias semanas a la puesta a punto de la impresora. Los pasos a seguir serían:

- Instalación de la impresora
- Evaluación del extrusor más apropiado de los tres proporcionados para montarlo
- Montaje del controlador y la PCB de la impresora con las características más acordes al proyecto
- Por último, se procederá al montaje de la impresora y se ajustarán los parámetros de su programa para controlarla.

Por otro lado, se realizarán pruebas con la impresora comercial de PioCreat en distintos materiales: PLA, ABS, PET, PETG, pellets de redes de pescar y mezcla para la caracterización. El objetivo es obtener los parámetros óptimos de impresión de temperatura de las dos zonas del extrusor y de la velocidad. Asimismo, se comparará la pieza impresa por pellets con una impresa por FDM con el fin de determinar el verdadero ahorro de tiempo y financiero que supone el FGF.

Por último, y en función del tiempo disponible, se quiere imprimir con mezcla de materiales con aditivos, como el ABS CF, y analizar los resultados.

4.1 PLANIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN ECONÓMICA

- Planificación

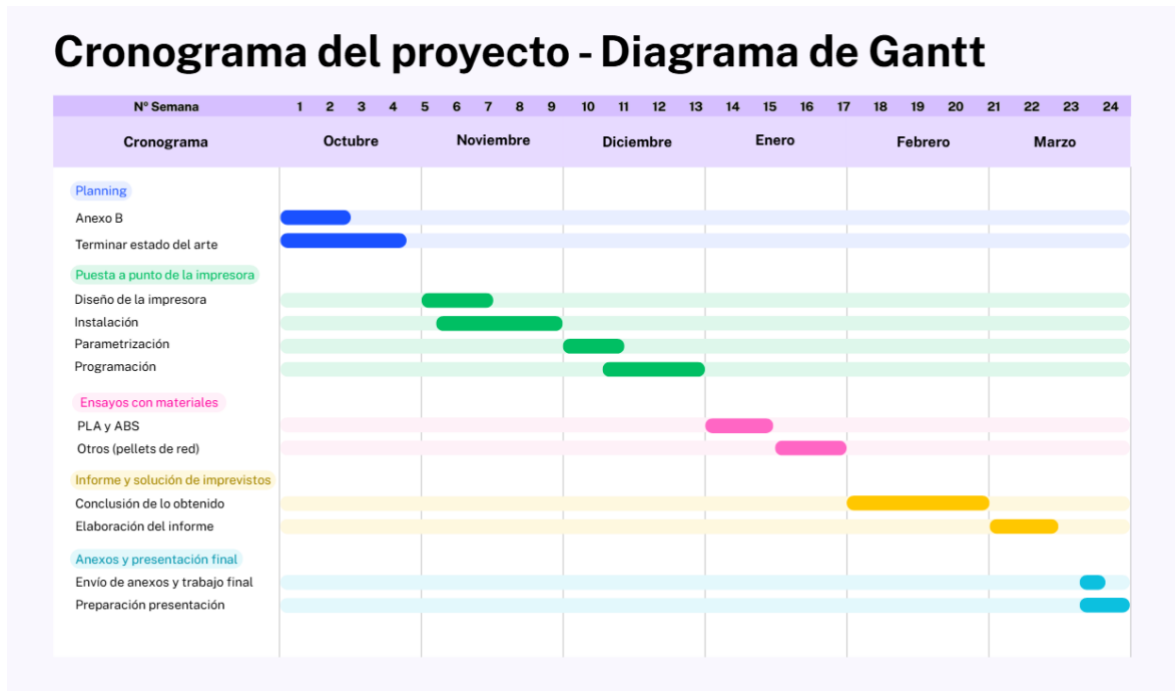


Figura 16: Diagrama de Gantt del proyecto

- Estimación del coste de desarrollo.

El coste de la impresora de PioCreat G5 Ultra es de **3950€**.

El número de piezas previstas a imprimir es de unas 6. Esto es porque el trabajo de optimización normalmente requiere varios intentos hasta conseguir una pieza satisfactoria, por lo que se prevé imprimir aproximadamente 3 piezas por cada material.

Los pellets de PLA tienen un coste de 10,45€/kg y los del ABS de 9,95€/kg. Teniendo en cuenta que se gastan 233g de pellets aproximadamente por cada pieza de referencia (de 300x300x205mm), tendremos que:



ANALISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FGF				
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA				
Precio máquina (€)			3.950	
Coste mantenimiento anual (€)			395	
Años de amortización			4	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día			1784	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)			0,72	
Precio Hora venta-público (€/h)			1,08	
DATOS COSTE MATERIAL				
		ABS		PLA
Coste material modelo: (€/kg)		9,95		10,45
Coste material soporte: (€/kg)		9,95		10,45
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA				
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)			25	
PIEZA Maceta				
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (g)	233,00	2,32	224,00	2,34 €/un
Soporte modelo (g)	0	0	0	0 €/un
Tiempo modelo (h)	6,00	6,48	8,20	8,85 €/un
Tiempo técnico-analista (h)	0,5	0	0,5	0 €/un
Cantidad de piezas	3		3	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	12,96 €/un		15,36 €/un	
Coste total (€) en ICAI + IVA	38,88 €		46,08 €	

Figura 17: Análisis de costes de FGF

Donde se pone un 50% sobre el precio hora máquina amortización para el cálculo del precio hora venta al público. Este margen tiene como objetivo no solo la obtención de beneficio, sino también la cobertura de costes indirectos asociados al proceso, tales como tiempos improductivos, fallos de impresión y otros factores, permitiendo así asegurar la viabilidad económica del sistema.

4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES

El proveedor de los pellets del proyecto es principalmente *Smart Materials* y *Nanovia*. A continuación, se describen los materiales utilizados para los experimentos de la impresora de PioCreat.

Ácido poliláctico (PLA)

El PLA es de los materiales más usados para impresión 3D, su combinación de temperatura de fusión no tan alta (de $173^{\circ}\text{C}^{[13]}$) y su origen de fuentes renovables, como el maíz o la caña de azúcar, haciendo que sea biodegradable, hace que sea un material ideal para la impresión 3D.

Aunque presenta algunas desventajas, como su degradación con temperaturas de 50° a 60° y su fragilidad con otros plásticos, sigue siendo uno de los favoritos a la hora de imprimir, y un básico a la hora de hacer cualquier proyecto en relación con la impresión 3D. Por otro lado, el PLA tiene varias aplicaciones como envases, desechables compostables (cubiertos y vajilla), y productos médicos y agrícolas, los cuáles deben ser biodegradables.

Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)

Otro material muy utilizado para la impresión 3D es el ABS, se caracteriza por su tenacidad, resistencia al impacto y rigidez. Su punto de fusión es de 240°C y es más resistente que el PLA a altas temperaturas. Sin embargo, son susceptibles a la deformación causada por bajas temperaturas, ya que se contrae al enfriarse.

Es un material derivado del petróleo por lo que no se considera ecológico o biodegradable. Entre sus aplicaciones se encuentran piezas funcionales como carcasas para la electrónica, piezas automotrices y juguetes.



Figura 18: ABS en forma de pellets

4.3 DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

4.3.1 IMPRESORA DE PELLETS PIOCREAT G5 ULTRA

Con el fin de realizar todos los ensayos necesarios para determinar la utilidad de los materiales, se tiene la impresora PioCreat G5Ultra desarrollada por Shenzhen PioCreat 3D Technology Co., Ltd. [2].



Figura 19: Impresora PioCreat G5 Ultra

Sus características^[2] son:

- Tamaño de la impresora: 765x890x1040 mm
- Volumen de impresión: 500x500x400 mm
- Altura de capa de 0,2 a 1,0 mm
- Incluye boquillas de diámetro de 0,4 a 2mm
- Consumo: alrededor de 7000W
- Materiales PA-CF, PA-GF, PC-CF, PLA, PETG-GF, ABS, PS, PP-GF
- Velocidad: hasta 220mm/s (flujo volumétrico 0,8 kg/h)
- Extrusión: de tornillo
- Temperatura máxima:
 - Boquilla: 420°C
 - Cama de impresión: 120°C
- Conectividad: USB, Wi-Fi
- Software: compatible con Cura y Simplify 3D, pero óptimo con el creado por la misma empresa PIOCreat_Slicer.



Figura 20: Impresora PioCreat del laboratorio de fabricación de ICAI

Esta impresora presenta varias ventajas:

- Su gran tamaño permite imprimir piezas muy grandes
- Permite usar pellets, por lo que el coste variable es reducido
- Alta eficiencia debido a su alta velocidad y capacidad de intercambio de material. La impresora se puede vaciar fácilmente gracias a su pequeña compuerta en la base del extrusor (Figura 21).
- La impresora también permite modificar parámetros como velocidad de flujo, altura de capa, temperatura de cama y extrusor y velocidad de impresión en tiempo real.
- Permite utilizar más tipos de materiales, entre ellos, reciclado.



Figura 21: Compuerta que permite el intercambio de pellets de diferente material

Respecto a su modo de funcionamiento:

- Una vez se ha montado la impresora con ayuda del manual, se debe calibrarla utilizando la función de calibración integrada directamente en su software, utilizando la pantalla de inicio. Cabe mencionar que la calibración se realizaba por láser, por lo que fue necesario apagar las luces en la zona de la impresora para asegurar que el sensor detectara el láser reflejado en la cama.
- Por este motivo también se realizaron todos los tests de impresión con poca luz. El proceso es muy simple, se elige el archivo G-code en el menú de la impresora para que comience a imprimir. En caso de necesitarlo, la impresora permite cambiar algunos de los parámetros en tiempo real, como ya se ha mencionado anteriormente como una de las ventajas de la PioCreat.

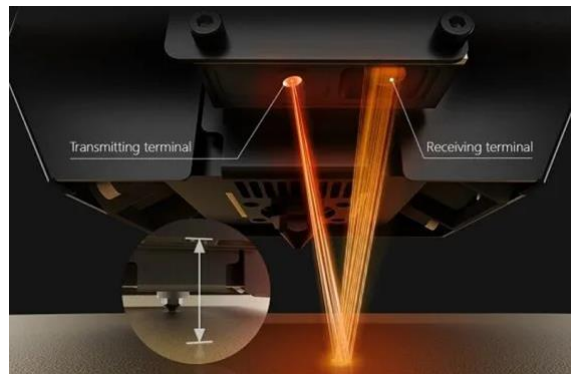


Figura 22: Funcionamiento del sistema de nivelación láser^[2]

Por otro lado, la impresora PioCreat G5 Ultra utiliza el firmware *Klipper*^[5], a diferencia de su predecesora, la G5, que utilizaba Marlin. Este cambio permite el monitoreo a través de Wi-Fi y el control remoto.

4.3.2 IMPRESORA DE FDM DT600

Con el fin de comparar las piezas fabricadas mediante el uso de pellets y de filamento, se ha seleccionado la impresora FDM DT600 como equipo de referencia. Su gran volumen de impresión permite la fabricación de piezas de dimensiones similares a las obtenidas con la impresora PioCreat, lo que garantiza una comparación directa y representativa entre ambas tecnologías. De este modo, se minimiza la influencia del tamaño de la pieza en los resultados obtenidos, centrando el análisis en las diferencias derivadas del sistema de extrusión y del material empleado. Además, el uso de una impresora 3D comercial ampliamente utilizada aporta un marco de referencia estable y reproducible para la evaluación de la calidad geométrica, el acabado superficial y las propiedades mecánicas de las piezas impresas.



Figura 23: Impresora de FDM DT600

4.4 DESCRIPCIÓN DE PROGRAMAS

4.4.1 SLICER

Se trata de un software que permite importar modelos 3D, realizar ajustes de impresión como la velocidad y la temperatura, y generar un archivo G-code que indica a la impresora 3D cómo imprimir el objeto capa por capa (Cura Slicer).



Figura 24: Logo de la marca UltiMaker y del software UltiMaker Cura

Por último, la impresora de gran formato PioCreat 5G Ultra viene preparada para utilizar su propio software, *PioCreat slicer*, para convertir los archivos a G-code. Fue desarrollado por la empresa específicamente para operar con sus impresoras 3D.



Figura 25: Logo PicoCrea slicer software

4.4.2 FIRMWARES DE CONFIGURACIÓN DE IMPRESORAS

Marlin

Marlin es un firmware de código abierto para controlar el hardware de impresoras 3D. Se trata de uno de los más utilizados para llevar a cabo la tarea de configuración de una impresora 3D. También es el que se utilizó para la construcción de una de las impresoras de filamento del laboratorio de Fabricación de ICAI, desarrollada por Jaime Rodríguez Rodríguez como parte de su TFG: Diseño, fabricación y montaje de una impresora 3D (FDM)^[4].

El objetivo era ajustar esta impresora para incorporar la extrusora de pellets, con el fin de hacerla intercambiable con la extrusora de filamento original. Para hacer este cambio posible, fue necesario modificar los archivos del firmware de Marlin.

Para compilar el código, se usa Visual Studio Code con la extensión PlatformIO IDE. Aquí se modificaron varios parámetros y se añadió código para crear el menú de elección de método de impresión (filamento o pellets).



Figura 26: Logos de Marlin Firmware, Visual Studio Code y PlatformIO IDE

Klipper

Se trata de otro firmware de código abierto para impresoras 3D, el cual utiliza la impresora de PioCreat del proyecto^[5]. Este se caracteriza por un gran rendimiento y velocidad. También es el utilizado en la impresora para la comunicación por WiFi además de permitir el control remoto.



Figura 27: Logo del Firmware para impresoras 3D Klipper

4.5 ELECCIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

En un inicio, los parámetros de impresión fueron aquellos recomendados en la lectura. En función de los resultados, estos se fueron ajustando hasta obtener piezas adecuadas.

Como hemos visto anteriormente, el extrusor de la impresora de PioCreat tiene dos zonas de calentamiento. En un primer momento, se eligieron las temperaturas de impresión para cada material según al artículo sobre extrusión de pellets^[17] y a su temperatura de fusión. También se añadió la temperatura de la cama de acuerdo con las recomendaciones:

<i>Material</i>	<i>Temperatura de fusión (°C)</i>	<i>Temperatura Superior (°C)</i>	<i>Temperatura Inferior (°C)</i>	<i>Temperatura de la cama (°C)</i>
PLA	173	160	200	60
ABS	240	240	240	90

Tabla 4: Temperaturas de extrusión por cada material

La elección de temperatura resulta fundamental puesto que el extrusor de pellets, a diferencia del de filamento, tiene problemas de retracción y no puede regular con tanta facilidad. Esto

implica que, si el material está muy caliente, este pueda resbalar por el tornillo de la extrusora y se produzca una sobre extrusión.

Asimismo, la velocidad de impresión recomendada es de 11 a 25 mm/s. En el desarrollo del proyecto veremos cómo una pequeña variación en este parámetro provoca grandes variaciones en la calidad dimensional y superficial de las piezas impresas. La elección de estos valores se basa en estudios previos que indican que velocidades bajas suelen mejorar la precisión y la adhesión entre capas, mientras que velocidades más altas permiten reducir los tiempos de fabricación, aunque sea a veces a costa de defectos superficiales o dimensionales. En una primera instancia, se eligieron:

	<i>Velocidad (mm/s)</i>	
PLA y ABS	Primera capa	10
	Resto de capas	11
	Perímetro	40

Tabla 5: Valores de velocidad

Para la realización de los experimentos, se utilizó una boquilla de 1mm. Según la lectura deberemos poner una altura de capa de entre el 25 al 80 % del diámetro de la boquilla, mientras que se recomienda que la primera capa sea un poco más alta para compensar las posibles irregularidades en la nivelación de la cama. De este modo, se asignaron los siguientes valores:

	<i>Altura de capa (mm)</i>	
PLA	Primera capa	0,55
	Resto de capas	0,45
ABS	Primera capa	0,6
	Resto de capas	0,5

Tabla 6: Valores de altura de capa

Adicionalmente, se configuró la impresora para que hiciera dos vueltas de perímetro antes de comenzar a imprimir la pieza. Con esto se consigue purgar el material acumulado en la boquilla, evitando defectos superficiales como *blobs* en la pieza, y asegurando una extrusión más estable y uniforme desde el comienzo del proceso.

Asimismo, se activaron funciones avanzadas como el *arc fitting* y el *spiral base*. El *arc fitting* contribuye a suavizar las trayectorias de impresión mediante la aproximación de

segmentos curvos, lo que reduce vibraciones y mejora la calidad superficial, especialmente útil para piezas de gran formato donde no es necesaria una resolución demasiado alta. Por otro lado, el *spiral base* favorece una transición más continua de las capas iniciales, optimizando la adhesión a la base y disminuyendo posibles discontinuidades. También permite aislar parámetros de impresión y evaluarlos independientemente, como es el caso de la temperatura y de la velocidad.

En cuanto a los parámetros de deposición, se definió un ancho de extrusión nominal de 1,4mm en el *slicer*. Este valor está condicionado por el diámetro de la boquilla (en nuestro caso de 1 mm), el caudal de material, la velocidad de impresión y la temperatura de extrusión. En el contexto de la tecnología FGF, la utilización de anchos de extrusión elevados es habitual, ya que permite incrementar la tasa de deposición y mejorar la cohesión entre cordones. Un valor de entre 120 al 150% del ancho de la boquilla es el recomendado para mantener un flujo estable, eficiente y de calidad aceptable para piezas de gran formato.

Capítulo 5. DESARROLLO DEL TRABAJO

5.1 ADAPTACIÓN DE UNA IMPRESORA 3D DE FILAMENTO A PELLETS

En el proyecto se presentan dos impresoras:

- PioCreat 5G Ultra, que utilizamos para la comparación de piezas hechas por FDM y por extrusión de pellets, FGF. Además de para determinar la temperatura y velocidad de extrusión óptimas.
- Impresora 3D FDM de escritorio, construida desde cero en el laboratorio de fabricación de ICAI. El objetivo es adaptarla para poder imprimir con material en forma de pellets.

Este capítulo se centra en esto último, es decir, en la construcción y adaptación de la impresora de escritorio para que sea capaz de imprimir tanto con pellets como con filamento.

5.1.1 ELECCIÓN DE EXTRUSOR

Tras hacer una investigación de las distintas extrusoras del mercado, se pidieron tres de diferentes páginas web de tipo tornillo simple, que prometían obtener buenos resultados:

Denominación de la extrusora	T _{máx}	D _{máx} de pellets	Ventajas	Desventajas
<i>Extrusora de pellets universal</i> (de AliExpress.com)	260°C	0,3mm	Fácil de ajustar a la impresora y precio bajo. Muy personalizable	Faltan varias partes de la extrusora, como ventiladores y pieza de alimentación de pellets
<i>Extrusora de pellets Funssor</i> (de AliExpress.com)	260°C	0,5mm	Precio bajo y fácil de modificar, permite pellets más grandes	Poca información sobre las especificaciones
<i>Extrusora de pellets Mahor V5</i> (de filament2print.com)	300°C	0,3mm	Totalmente montado, permite modificar el flujo con el bloque térmico (con $Q_{\text{flujo}} < 0,2 \text{ kg/h}$)	Precio alto

Tabla 7: Extrusoras candidatas

Finalmente, se eligió la extrusora Mahor ya que presentaba mayores facilidades de adaptación para la impresora.



(a) Extrusora de universal



(b) Extrusora de Funssor



(c) Extrusora de Mahor V5

Figura 28: Extrusoras de pellets

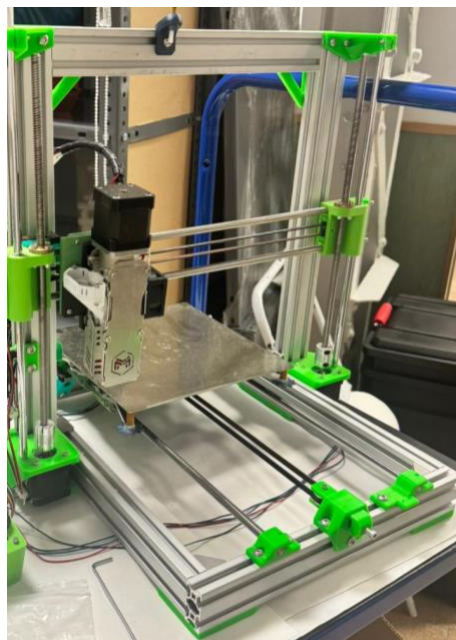


Figura 29: Impresora de escritorio adaptada a pellets

5.1.2 MODIFICACIÓN DE LA IMPRESORA

Para colocar la extrusora en la impresora se diseñó e imprimió un soporte para fijarlo al eje de la misma. Este se diseñó en SolidEdge asegurando que ajustándolo con las medidas del soporte de la impresora y de la extrusora.

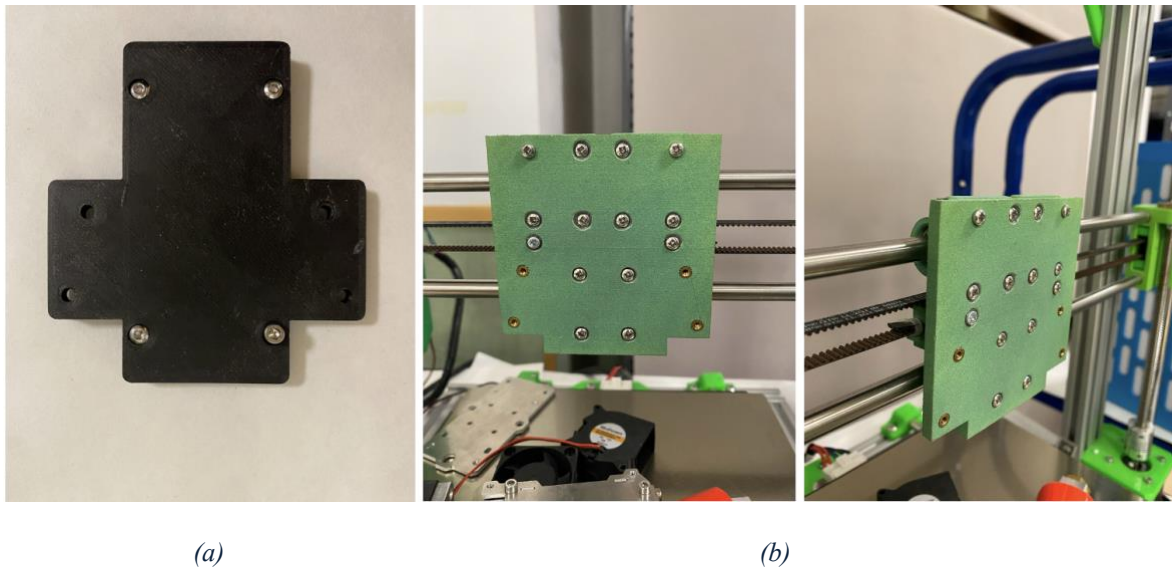


Figura 30: Soporte utilizado para la extrusora de Mahor (a) parte fijada en la extrusora (b) parte fijada en la impresora

5.1.3 AJUSTE DEL FIRMWARE

Finalmente, el reto estaba en el código de la impresora. Se tenían que hacer varios ajustes al código original con el fin de que poder utilizar la extrusora de pellets. Por un lado, en el archivo propio del firmware de Marlin, se mantenían los valores del archivo *platformio.ini*:

```
[platformio]
src_dir      = Marlin
boards_dir   = buildroot/share/PlatformIO/boards
default_envs = LPC1769
include_dir  = Marlin
```

Figura 31: Código para definir el entorno de Marlin

También se mantienen los valores de *configuration.h*:

- La placa: una placa *SKR V1.4* que se alimenta con 3,3V.

```
#ifndef MOTHERBOARD
#define MOTHERBOARD BOARD_BTT_SKR_V1_4_TURBO
#endif
```

Figura 32: Código que indica el tipo de placa utilizada en la impresora

- Los controladores (drivers) para los motores. En este caso el motor de la impresora es un NEMA 17 bipolar, el cual utiliza el mismo tipo de controlador, con denominación TMC 2209, que el de la extrusora de filamento original.

```
#define X_DRIVER_TYPE  TMC2209 //Controlador usado en todos los motores
#define Y_DRIVER_TYPE  TMC2209
#define Z_DRIVER_TYPE  TMC2209
```

Figura 33: Código para definir los drivers de la impresora

- La pantalla: la impresora utiliza la pantalla RAMPS MKS MINI 12864 que funciona a 3,3V.

```
//#define ZONESTAR_LCD // Pantalla utilizada en la plantilla
#define MKS_MINI_12864_V3 // Pantalla utilizada en mi proyecto
#define NEOPIXEL_LED // Mi pantalla dispone de luces LED cuyo color es editable.
#if ENABLED(NEOPIXEL_LED)
  #define NEOPIXEL_TYPE NEO_RGB
...
```

Figura 34: Código de definición de la pantalla



Figura 35: Pantalla LCD RAMPS MKS MINI 12864

En este archivo también se tuvo que añadir código para que apareciera un menú principal de elección de la extrusora de la impresora, la de filamento o la de pellets.

Los parámetros que sí que había que cambiar en *configuration.h* eran:

- Los relacionados con la **calibración PID**. Esto sirve para calibrar el sensor de temperatura para que correspondiese con el calor desprendido por la resistencia de la extrusora, de esta forma la temperatura requerida por el usuario correspondería con la temperatura real. Se trata de hacer iteraciones calentando y enfriando el extrusor, con la ayuda del programa Pronterface, que habilita la comunicación entre ordenador e impresora, pudiendo enviar comandos de instrucciones directamente desde el ordenador. La calibración se hace automáticamente una vez se ejecuta el comando `M303 E0 S220 C8`, donde el primer valor indica que se realice la calibración. E0 indica que el extrusor

es de pellets, S220 que la temperatura máxima a la que caliente sea de 220 grados y C8 el número de iteraciones (ciclos) que debe hacer. Una vez acabado el proceso, se guardan los valores generados por el programa y se copian en el código en el comando denominado *M303* del control PID.

```
SENDING:M303 E0 S220 C8
PID Autotune start
bias: 153 d: 101 min: 217.50 max: 223.75 Ku: 41.15 Tu: 28.21
Classic PID
Kp: 24.69 Ki: 1.75 Kd: 87.06
bias: 140 d: 114 min: 217.92 max: 223.50 Ku: 51.99 Tu: 24.91
Classic PID
Kp: 31.20 Ki: 2.50 Kd: 97.15
bias: 138 d: 116 min: 217.29 max: 223.50 Ku: 47.58 Tu: 24.90
Classic PID
Kp: 28.55 Ki: 2.29 Kd: 88.84
bias: 139 d: 115 min: 216.46 max: 224.00 Ku: 38.83 Tu: 26.66
Classic PID
Kp: 23.30 Ki: 1.75 Kd: 77.63
bias: 139 d: 115 min: 216.25 max: 224.00 Ku: 37.79 Tu: 27.23
Classic PID
Kp: 22.67 Ki: 1.67 Kd: 77.16
bias: 138 d: 116 min: 216.46 max: 224.25 Ku: 37.91 Tu: 27.40
Classic PID
Kp: 22.75 Ki: 1.66 Kd: 77.90
PID Autotune finished! Put the last Kp, Ki and Kd constants from below into
Configuration.h
#define DEFAULT_Kp 22.75
#define DEFAULT_Ki 1.66
#define DEFAULT_Kd 77.90
Disconnected.
Connecting...
Printer is now online.
```

Figura 36: Resultados de la calibración del control PID

- Los relacionados con la **calibración de los pasos del extrusor**. Los pasos es el número de veces que el motor gira para 1 vuelta del extrusor. Por un lado, el coeficiente del motor NEMA 17 del extrusor, según su hoja de especificaciones, es 1,8º/paso, donde un paso es una vuelta del motor. El motor lleva un reductor de 5,18. Con estos datos y sabiendo que la extrusora de filamento tiene un reductor de 3:1, aprovechamos el valor del código para el comando *M92* y utilizamos una regla de tres para calcular el valor de pasos del extrusor de pellets:

$$420 \rightarrow 3$$

$$x \rightarrow 5,18$$

$$x = 420 \cdot 1,726 = 725,2 \frac{\text{pasos}}{\text{mm}}$$

Por último, se añadió en el menú una opción *Extrusion Mode* de elección entre filamento y pellets. Para ello, se implementaron perfiles configurables accesibles desde el menú LCD,

que utilizan comandos G-code estándar soportados nativamente por Marlin, con el fin de evitar modificaciones directas del núcleo del firmware.

Para cada modo se definían los siguientes comandos:

- M92: ajusta los pasos por milímetro del extrusor (eje E). En el caso del filamento, será de 420 pasos/mm mientras que en el de pellets será de 725,2 pasos/mm, según se ha calculado anteriormente.
- M203: define la velocidad máxima del extrusor (igualmente eje E). Para filamento, esto viene indicado en la especificación del extrusor y es de 50 mm/s mientras que para pellets será de 15 mm/s.
- M204: define la aceleración por defecto del extrusor. Tanto la del filamento como la de pellets será de 500 mm/s².
- M301: indica los valores de los coeficientes del control PID: Kp, Ki y Kd
- M500: es el comando que hace que se guarden estos valores en el EEPROM, es decir, en la memoria del controlador.

```
// Custom Menu: Main Menu
#define CUSTOM_MENU_MAIN
#define CUSTOM_MENU_MAIN_TITLE "Extrusion Mode"
#define MAIN_MENU_ITEM_1_DESC "Perfil Filamento"
#define MAIN_MENU_ITEM_1_GCODE \
    "M92 E420\n" \
    "M203 X400 Y400 E50\n" \
    "M204 T500\n" \
    "M301 P20.06 I1.13 D87.3\n" \
    "M500"
#define MAIN_MENU_ITEM_2_DESC "Perfil Pellets"
#define MAIN_MENU_ITEM_2_GCODE \
    "M92 E725.2\n" \
    "M203 X120 Y120 E15\n" \
    "M204 T500\n" \
    "M301 P30 I2 D200\n" \
    "M500"
```

Figura 37: Código con la definición de los perfiles del menú filamento-pellets

5.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES CON UNA IMPRESORA 3D COMERCIAL

5.2.1 PATRONES DE TEST

Con el fin de analizar la calidad de impresión de las piezas, se imprimen lo que se denominan patrones de test. Se trata de piezas estandarizadas y diseñadas por la comunidad, con el objetivo de medir algún aspecto crucial de la impresión 3D como tolerancias, detalle y en general, calidad de las piezas. En este caso, se utiliza el archivo *Plant_Pot*, obtenido de la plataforma *Creality Cloud*. Una pieza ideal para realizar las pruebas de impresión, ya que puede ser escalada a dimensiones mayores, manteniendo un nivel significativo de complejidad geométrica.



Figura 38: Patrón de test *Plant_Pot*

Por otro lado, la impresora de PioCreat venía con un archivo G-code de una vasija, la cual se utilizó en un primer momento como referencia para hacer los tests de parametrización de velocidad y temperatura.

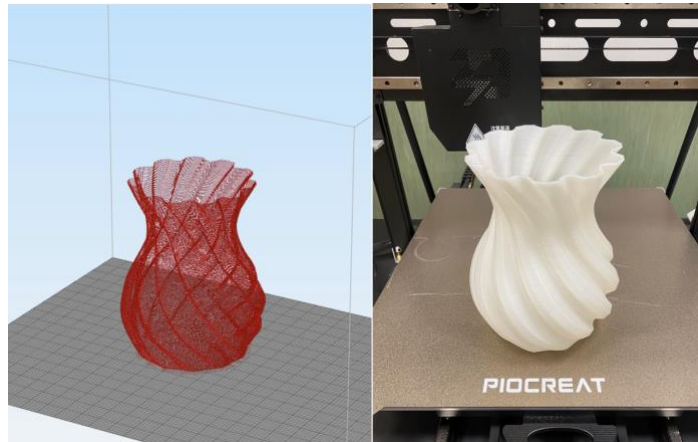


Figura 39: Vasiija utilizada como referencia

5.2.2 IMPRESIÓN 3D CON ABS Y PLA

En el contexto de la impresión 3D con termoplásticos, los materiales más habituales de impresión son el PLA y el ABS. Su gran potencial los convierte en los materiales más utilizados en este ámbito, y es esa la razón por la cual se ha elegido empezar a imprimir con ellos. El objetivo es conseguir optimizar los parámetros de impresión según las características de cada material.

5.2.2.1 Resultados del ABS

El ABS que se utiliza en los experimentos tiene una densidad de $1,04\text{g/cm}^3$ y una temperatura de fusión de 240°C .

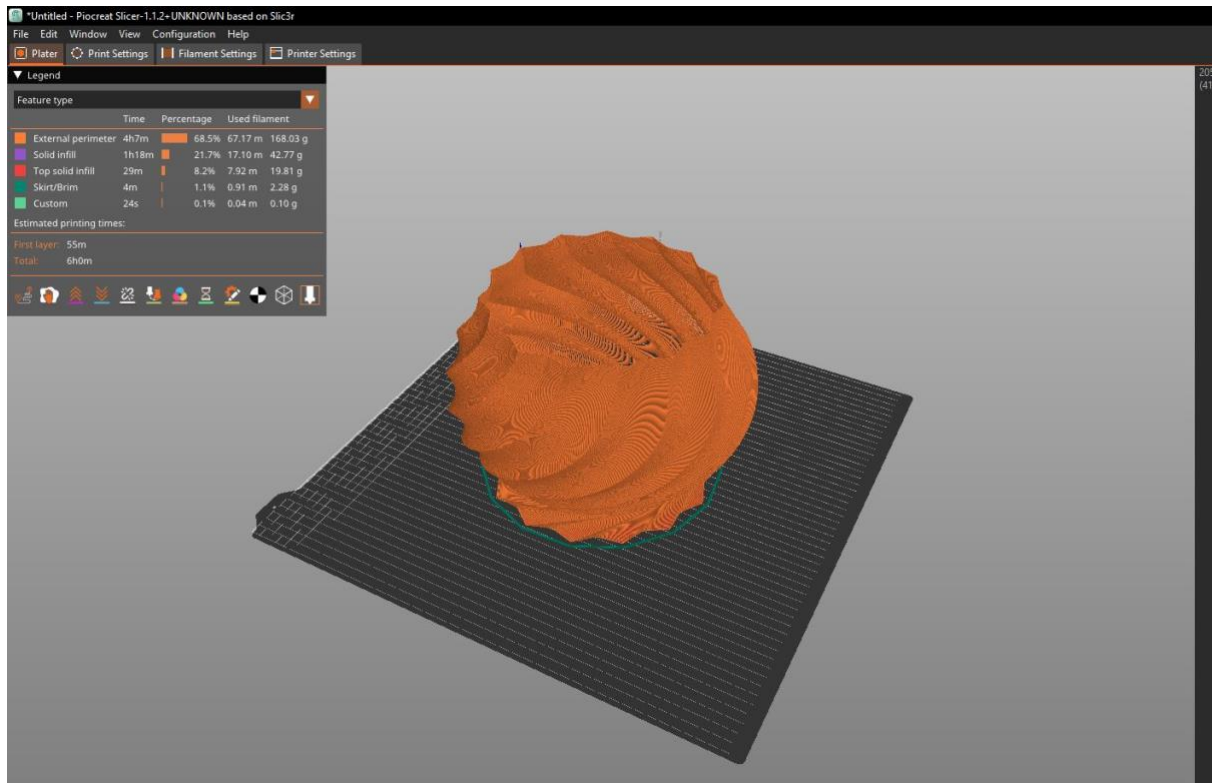


Figura 40: laminado de la maceta con ABS

Para determinar parámetros óptimos de impresión, se realizaron varias iteraciones imprimiendo con ABS en la PioCreat 5G Ultra. Inicialmente, se emplearon temperaturas de extrusor de 200 y 210 °C y una cama a 90 °C, lo que resultó en desprendimientos parciales y cordones irregulares.



Figura 41: Problemas con la primera capa de ABS

Intento inicial

Nombre del parámetro			Valor
Temperatura	Parte Alta (<i>Upper Nozzle</i>)	Primera capa	235°C
		Resto de capas	230°C
	Parte Baja (<i>Nozzle</i> , más próxima a la boquilla)	Primera capa	245°C
		Resto de capas	240°C
	Cama	Primera capa	100°C
		Resto de capas	90°C
Altura de capa (mm)	Primera capa		0.60 mm
	Resto de capas		0.50 mm
Loops (contorno)			2
Velocidad (mm/s)	Primera capa		10 mm/s
	Resto de capas		11 mm/s
	Perímetro		40 mm/s
	Viaje		100 mm/s
Ancho de extrusión (mm)	Primera capa		1.4 mm
	Resto de capas		1.1 mm
Tamaño (mm)			300.92x300.32x205.12mm
Filamento usado (g)			1137.43g
Printing time			1d10h22m
Spiral base			No habilitado
Perímetros			2

Tabla 8: Tabla con parámetros teóricos iniciales del ABS

Vistos los resultados de la pieza, se decidió activar la función de *spiral base*. Esta estrategia permitía aislar la influencia de los parámetros de impresión sobre la calidad de deposición del material, eliminando variables adicionales como el relleno interno o las capas sólidas y centrando el análisis en parámetros como la velocidad, temperatura y altura de capa. De esta manera, se pudo evaluar la calidad superficial de las paredes, la estabilidad del flujo de material, la uniformidad del cordón extruido y la adhesión de la primera capa.

A partir de varias iteraciones, se ajustaron progresivamente los parámetros: se incrementó la temperatura del extrusor a 225 y 230 °C y de la cama a 105 °C, se redujo la velocidad de la primera capa a 10–15 mm/s, se aumentó la altura y anchura del cordón de la primera capa (0,65 mm y 1,4 mm respectivamente) y se elevó el flujo de material al 110 %. Estos cambios permitieron mejorar significativamente la adhesión y homogeneidad de la base, proporcionando un soporte estable para las capas posteriores y reduciendo defectos

relacionados con despegues y contracciones. Asimismo, cabe destacar que el uso de pegamento en la cama de impresión influyó significativamente en la calidad de la primera capa, mejorando su adhesión y uniformidad.

Intento final

<i>Nombre del parámetro</i>			<i>Valor</i>
Temperatura	Parte Alta (<i>Upper Nozzle</i>)	Primera capa	225°C
		Resto de capas	220°C
	Parte Baja (<i>Nozzle</i>)	Primera capa	235°C
		Resto de capas	230°C
	Cama	Primera capa	90°C
		Resto de capas	90°C
Altura de capa (mm)		Primera capa	0.6 mm
		Resto de capas	0.5 mm
Loops (contorno)			2
Velocidad (mm/s)		Primera capa	10 mm/s
		Resto de capas	11 mm/s
		Perímetro	40 mm/s
		Viaje	100 mm/s
Ancho de extrusión (mm)		Primera capa	1.4 mm
		Resto de capas	1.1 mm
Tamaño (mm)			300.92x300.32x205.12mm
Filamento usado (g)			232,99g
Printing time			21h17m
Spiral base			<i>Habilitado</i>
Perímetros			2

Tabla 9: Tabla con parámetros óptimos del ABS



Figura 42: Piezas impresas con ABS

5.2.2.2 Resultados del PLA

El PLA tiene una densidad de $1,24 \text{ g/cm}^3$ y una temperatura de fusión de 173°C , siguiendo los parámetros definidos en el apartado de *Metodología*, se realizaron varios experimentos, en los que se obtuvieron los siguientes resultados:

Intento inicial

Nombre del parámetro			Valor
Temperatura	Parte Alta (<i>Upper Nozzle</i>)	Primera capa	165°C
		Resto de capas	160°C
	Parte Baja (<i>Nozzle</i>)	Primera capa	215°C
		Resto de capas	210°C
	Cama	Primera capa	60°C
		Resto de capas	60°C

Altura de capa (mm)	Primera capa	0.45 mm
	Resto de capas	0.5 mm
Loops (contorno)		2
Velocidad (mm/s)	Primera capa	10 mm/s
	Resto de capas	11 mm/s
	Perímetro	40 mm/s
	Viaje	100 mm/s
Ancho de extrusión (mm)	Primera capa	1,4 mm
	Resto de capas	1,1 mm
Tamaño (mm)		110.67x110.45x75.44 mm
Filamento usado (g)		93,14 g
Printing time		6h

Tabla 10: Tabla con parámetros teóricos iniciales del PLA

Sin embargo, estos parámetros produjeron una pieza defectuosa, en la que algunas capas de la pieza se habían despegado, por lo que se optó por parar la impresión. En este punto solo había dos opciones, o bien disminuir la altura de capa o bien aumentar la temperatura. Se optó por la segunda opción, aumentando la temperatura en el *Upper Nozzle* a unos 200°C, con el fin de que hubiese un incremento más progresivo de la temperatura del pellet. De esta manera, se obtuvieron los resultados:

Intento final

<i>Nombre del parámetro</i>			<i>Valor</i>
Temperatura	Parte Alta (<i>Upper Nozzle</i>)	Primera capa	200°C
		Resto de capas	195°C
	Parte Baja (<i>Nozzle</i>)	Primera capa	220°C
		Resto de capas	210°C
	Cama	Primera capa	65°C
		Resto de capas	60°C
Altura de capa (mm)	Primera capa	0.45 mm	
	Resto de capas	0.55 mm	
Loops (contorno)			2
Velocidad (mm/s)	Primera capa	10 mm/s	
	Resto de capas	11 mm/s	
	Perímetro	40 mm/s	
	Viaje	100 mm/s	
Ancho de extrusión (mm)	Primera capa	1.4 mm	
	Resto de capas	1.1 mm	
Tamaño (mm)			300.77x300.18x205.03mm
Filamento usado (g)			44.63g
Printing time			1h19m

Tabla 11: Tabla con parámetros óptimos del PLA



Figura 43: Pieza de PLA

Capítulo 6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

6.1 ANÁLISIS DE VARIABLES DE PROCESO

6.1.1 TEMPERATURA

En relación con la temperatura de impresión, los resultados obtenidos ponen de manifiesto la necesidad de ajustar los valores teóricos recomendados por el fabricante a las condiciones reales del proceso. En particular, se observó que la temperatura del *Upper Nozzle* tuvo que incrementarse respecto al valor teórico para garantizar un flujo de material estable y continuo, evitando problemas de subextrusión y mejorando la calidad del cordón depositado.

Asimismo, se comprobó que una temperatura de la cama de impresión más elevada durante la primera capa favorece significativamente la adhesión inicial, reduciendo defectos como el *warping* y mejorando la uniformidad de la base. Este ajuste resulta especialmente relevante en procesos FGF, donde la correcta fijación de la primera capa condiciona la estabilidad del resto de la pieza.

Del mismo modo, fue necesario aumentar la temperatura del extrusor con respecto a los valores iniciales basados en la lectura, para asegurar una adecuada fusión del material y una deposición homogénea. Este incremento contribuyó a mejorar la cohesión entre capas y la regularidad del flujo, aspectos clave para la calidad final de la pieza.

En conjunto, estos resultados evidencian que los parámetros térmicos deben ser ajustados de manera empírica en función del material, la geometría y las condiciones específicas de impresión, no siendo siempre suficientes los valores teóricos como punto de operación óptimo.

6.1.2 ALTURA DE CAPA

La altura de capa es un parámetro fundamental en los procesos de fabricación aditiva por extrusión, ya que determina la resolución vertical de la pieza y condiciona directamente la

calidad superficial, la adhesión entre capas y el comportamiento mecánico del material depositado. En este trabajo se emplearon alturas de capa elevadas, acordes con el uso de una boquilla de 1 mm y con el alto caudal característico de la impresora de pellets PioCreat 5G Ultra, fijándose un valor de 0,5 mm para las capas regulares.

No obstante, se definió una altura de capa superior en la primera capa (0,6–0,7 mm) con el fin de mejorar la adherencia a la cama y compensar posibles irregularidades de planitud. La selección y ajuste de este parámetro se realizó de forma iterativa, evaluando su influencia en la estabilidad dimensional, la continuidad del cordón extruido y la calidad de la base, especialmente en configuraciones de *spiral base*, donde la correcta ejecución de la primera capa resulta crítica para el éxito de la impresión.

6.1.3 VELOCIDAD DE IMPRESIÓN

Como se ha visto en la lectura, la velocidad de impresión es uno de los parámetros clave junto con la temperatura, ya que determina el caudal de material que el husillo puede suministrar de forma estable. En este sentido, la velocidad de impresión está limitada por el caudal volumétrico del sistema, que depende del tipo de material, la temperatura de procesado y la velocidad de rotación del husillo. Por tanto, debe ajustarse en función del caudal que puede suministrar el husillo sin generar defectos como la subextrusión.

De forma teórica, para el PLA, considerando una temperatura de fusión en torno a 173 °C y una rotación del husillo de entre 15 y 30 rpm, se obtendrían velocidades de impresión comprendidas entre 40 y 80 mm/s. Por su parte, para el ABS (con una temperatura de fusión aproximada de 240 °C), podrían alcanzarse velocidades ligeramente superiores, en el rango de 60 a 100 mm/s.

Además, esta velocidad se verá afectada también por el diámetro de la boquilla, ya que este determina el área de deposición y, por tanto, el caudal de material extruido. El caudal volumétrico (Q) puede expresarse como:

$$Q = v_{imp} \cdot A_{boquilla}$$

Donde v es la velocidad de impresión y A el área de la sección extruida. A su vez, este caudal debe ser coherente con la velocidad de rotación del tornillo para garantizar una extrusión continua y estable.

No obstante, a pesar de estos valores teóricos, los ensayos experimentales pusieron de manifiesto la necesidad de reducir significativamente la velocidad de impresión para garantizar una correcta deposición del material, especialmente en la primera capa. En consecuencia, se establecieron de manera empírica una velocidad de 10mm/s para la primera capa y de 11mm/s para el resto, lo que permitió mejorar la adhesión, la uniformidad y la estabilidad del proceso.

6.1.4 SPIRAL BASE

El parámetro *spiral base* consiste en imprimir la pieza como una única pared continua que asciende de manera helicoidal desde la base hasta la altura total del modelo, eliminando la necesidad de capas superiores planas y rellenos internos. Esta estrategia permite obtener paredes uniformes y reduce el tiempo de impresión, sin embargo, implica que la primera capa debe estar perfectamente adherida a la cama, ya que cualquier despegue o irregularidad se propagará a lo largo de toda la pieza.

En el contexto del trabajo, se utilizó el modo *spiral base* para analizar la influencia de los parámetros de impresión en la calidad de la base y en la estabilidad dimensional de las piezas, mediante ajustes iterativos de temperatura, velocidad, altura y anchura de la primera capa, con el fin de asegurar un flujo de material constante y una adhesión óptima. Activar este modo implica que no haya capas sólidas, es decir, que la capa de la base se reduzca al mínimo

y que no se emplee ningún tipo de relleno, obteniendo una pieza totalmente hueca y de espesor uniforme.

En resumen, habilitar *spiral base* reduce significativamente tanto el tiempo de impresión como la cantidad de material, permitiendo evaluar parámetros de impresión como la velocidad o temperatura de forma aislada, proporcionando así un criterio uniforme para la comparación de resultados en los que evaluar el comportamiento de materiales y la calidad de la deposición.

6.1.5 ACOPLAMIENTO DE CAPAS

El acoplamiento de capas es un factor clave en la calidad mecánica de las piezas fabricadas mediante impresión 3D por extrusión de pellets (FGF), ya que determina la adhesión entre capas consecutivas. Esta unión se produce principalmente por difusión térmica y molecular entre el material recién depositado y la capa anterior.

La temperatura de extrusión es uno de los parámetros más influyentes: valores bajos reducen la difusión y empeoran la adhesión, mientras que temperaturas altas la favorecen, aunque pueden afectar a la precisión. La velocidad de impresión también influye, ya que velocidades elevadas reducen el tiempo de transferencia de calor entre capas.

Además, parámetros como el diámetro de la boquilla y la altura de capa afectan al área de contacto y a la retención de calor, condicionando la calidad de la unión. Por ello, en sistemas FGF es fundamental ajustar conjuntamente estos parámetros para evitar defectos como la delaminación.

En un primer momento, el acoplamiento entre capas no era bueno con los valores teóricos, por lo que fue necesario cambiar algunos parámetros, reduciendo la velocidad, aumentando la temperatura y disminuyendo la altura de capa.

6.2 OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

Después de varias iteraciones, se obtuvieron, del ABS y del PLA los siguientes parámetros de impresión:

Parámetros óptimos

Nombre del parámetro			Valor ABS	Valor PLA
<i>Temperatura</i>	Parte Alta (Upper Nozzle)	Primera capa	225°C	200°C
		Resto de capas	220°C	195°C
	Parte Baja (Nozzle)	Primera capa	235°C	220°C
		Resto de capas	230°C	210°C
	Cama	Primera capa	90°C	65°C
		Resto de capas	90°C	60°C
<i>Altura de capa (mm)</i>		Primera capa	0.6 mm	0.45 mm
		Resto de capas	0.5 mm	0.55 mm
<i>Loops (contorno)</i>			2	2
<i>Velocidad (mm/s)</i>		Primera capa	10 mm/s	10 mm/s
		Resto de capas	11 mm/s	11 mm/s
		Perímetro	40 mm/s	40 mm/s
		Viaje	100 mm/s	100 mm/s
<i>Ancho de extrusión (mm)</i>		Primera capa	1.4 mm	1.4 mm
		Resto de capas	1.1 mm	1.1 mm
<i>Tamaño (mm)</i>			300,92x300,32x205,12mm	110,67x110,45x75,44
<i>Filamento usado (g)</i>			232,99g	44,63g
<i>Printing time</i>			21h17m	1h19m
<i>Spiral base</i>			Habilitado	Habilitado
<i>Perímetros</i>			1	1

Utilizando estos parámetros se obtuvieron piezas de calidad, con tiempo y costes reducidos y con características adecuadas para este tipo de aplicación de prototipado de piezas.

6.3 COMPARATIVA CON FDM

Para realizar una comparativa equivalente, se realizó el análisis de costes para tres macetas de 300x300x300. De esta manera, se realizaron simulaciones de impresiones en Cura Slicer para la impresora DT 600 del laboratorio. Además, se aplicaron los mismos parámetros que para el FGF, esto es:

- Boquilla de 1mm de diámetro
- Spiral base o modelo espiralizado
- Velocidad de impresión de 11mm/s
- Altura de capa de 0,5mm

Por otro lado, para el resto de los parámetros, se introdujeron aquellos que habían demostrado en trabajos anteriores, ser los óptimos para la obtención de piezas de calidad. Estos eran:

- Temperatura de 200°C para PLA y de 230°C para ABS.
- Temperatura de la cama 60°C.
- Ver tiempos de cada impresora para imprimir, según proporción (ponderados) y cada cuanto hay que reponer el material.

De esta forma, se tienen los parámetros de simulación en el Slicer:

			FGF	FDM	
Nombre del parámetro			ABS	PLA	ABS
Temperatura	Upper Nozzle		220°C	195°C	
	Nozzle		230°C	210°C	
	Cama	Primera capa	90°C	65°C	230°C
		Resto de capas	90°C	60°C	200°C
Altura de capa (mm)		Primera capa	0.6 mm	0.45 mm	
		Resto de capas	0.5 mm	0.55 mm	0.5 mm
Velocidad (mm/s)		Primera capa	10 mm/s		
		Resto de capas	11 mm/s		11mm/s

<i>Ancho de extrusión (mm)</i>	<i>Primera capa</i> <i>Resto de capas</i>	1.4 mm 1.1 mm	1.4 mm 1.1 mm		
<i>Tamaño (mm)</i>		300.92x300.32x205.12mm			
<i>Filamento usado (g)</i>		232,99g	44.63g	214 g	255g
<i>Printing time</i>		6h	8h12min	16h16min	16h16min
<i>Spiral base</i>		Habilitado			

Figura 44: Parámetros de impresión para FGF y FDM

6.3.1 COSTE ECONÓMICO Y REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE IMPRESIÓN

Desde el punto de vista económico, la fabricación mediante pellets presenta ventajas significativas, especialmente en términos de coste de material. Esta diferencia suele ser de entre 5 a 10 €/kg dependiendo del material con respecto al filamento, es decir su coste variable es menor. Esto se debe a la eliminación de los procesos de transformación y comercialización asociados al filamento.

Por otro lado, el coste de los equipos FGF es generalmente superior al de las impresoras FDM convencionales. Este tipo de impresoras implican una mayor complejidad mecánica y requieren sistemas de control térmico y de potencia más robustos. Sin embargo, este mayor coste inicial puede amortizarse en aplicaciones industriales o de gran volumen, gracias al ahorro de material y a la mayor tasa de deposición. Además, cuando la comparamos con la impresora DT600, capaz de imprimir, al igual que la FGF, piezas de gran formato, encontramos que la impresora de pellets es más competitiva. Es importante apuntar que esto no suele ser así, la complejidad de las impresoras de pellets hace que estas suelen ser más caras. Sin embargo, para esta aplicación en concreto, la impresión FGF parece una mejor alternativa.

En términos operativos, también han de tenerse en cuenta factores como el mantenimiento de la impresora y la necesidad de calibración más precisa, que pueden incrementar ligeramente los costes de operación frente a sistemas FDM.

Podemos observar en la siguiente figura, el análisis de costes para la impresora de FDM DT 600:



ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM					
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA					
Precio máquina (€)	38.750				
Coste mantenimiento anual (€)	3.875				
Años de amortización	5				
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	1784				
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	5,65				
Precio Hora venta-público (€/h)	8,47				
DATOS COSTE MATERIAL					
	ABS		PLA		
Coste material modelo: (€/kg)	18,99		16,23		
Coste material soporte: (€/kg)	18,99		16,23		
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA					
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	20				
PIEZA Maceta					
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Sólido	Costes parciales	Opción Sólido	Costes parciales	
Material modelo (g)	214	4,06	255	4,14	€/un
Soporte modelo (g)	0	0	0	0	€/un
Tiempo modelo (h)	16,27	137,83	16,27	137,83	€/un
Tiempo técnico-analista (h)	0,5	0	0,5	0	€/un
Cantidad de piezas	3		3		
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	145,22 €/un		145,30 €/un		
Coste total (€) en ICAI + IVA	435,67 €		435,89 €		

Figura 45: Análisis de costes de la impresora DT 600

Si comparamos los costes unitarios y totales, con los de la impresora de PioCreat (hecho en *Metodología*, en el apartado de 4.1. *Planificación y Estimación Económica*) obtenemos:

	ABS		PLA	
	FGF	FDM	FGF	FDM
<i>Tiempo en imprimir una pieza</i>	6h	16h16min	8h12min	16h16min
<i>Coste unitario (€/un)</i>	12,96	145,22	15,36	145,30
<i>Coste total</i>	38,88	435,67	46,08	435,89
<i>Ahorro unitario</i>	132,26 €/un		129,94 €/un	
<i>Ahorro total</i>	396,78 €		389,82 €	

Tabla 12: Comparación de costes entre FGF y FDM

Con estos resultados podemos ver cómo se ha reducido significativamente el tiempo de impresión, casi a la mitad con respecto al FDM. Si consideramos el tiempo de ciclo, teniendo

en cuenta que nos hemos saltado la etapa de fabricación del filamento, el tiempo operativo de impresión se reduce drásticamente.

Asimismo, con el fin de evaluar la influencia de la amortización del equipo sobre el coste total de fabricación, se realizó un análisis adicional suponiendo un coste horario de máquina idéntico para ambas tecnologías. De este modo, la comparación se centra únicamente en las diferencias derivadas del tiempo de fabricación y del coste del material empleado.

	<i>ABS</i>		<i>PLA</i>	
	FGF	FDM	FGF	FDM
<i>Tiempo en imprimir una pieza</i>	6h	16h16min	8h12min	16h16min
<i>Coste unitario (€/un)</i>	12,96	22,23	15,36	21,52
<i>Coste total</i>	38,88	66,68	46,08	64,56
<i>Ahorro unitario</i>	6,16 €/un		9,26 €/un	
<i>Ahorro total</i>	18,49 €		27,79 €	

Tabla 13: Comparación de costes entre FGF y FDM con costes de máquina idénticos

Bajo esta hipótesis, el ahorro económico asociado al FGF continúa siendo significativo, situándose en un 42% para el ABS y en un 29% para el PLA. Esto indica que, aunque la diferencia en el coste de adquisición de los equipos influye notablemente en el resultado del caso de estudio, la impresión mediante pellets sigue presentando una ventaja económica gracias a la menor duración del proceso y al menor coste de la materia prima, especialmente a la hora de imprimir piezas de gran formato.

6.3.2 REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

Otro aspecto importante de FGF es la capacidad que tiene de permitir imprimir con material reutilizado de forma directa, uno de sus principales beneficios. A diferencia de los sistemas basados en filamento, la tecnología FGF permite reutilizar los gránulos reciclados sin

necesidad de volverlo a convertir en filamento. Además, este paso también puede conllevar a una gran pérdida de propiedades del material virgen, algo que se evita al extruirlo directamente.

De esta forma, reducimos el impacto ambiental. Por un lado, reduciendo el consumo energético asociado a la transformación del material. Por otro, facilitando la reutilización de residuos plásticos procedentes de residuos de impresión o de incluso piezas defectuosas previamente impresas, cerrando parcialmente el ciclo de vida del material.

En aplicaciones reales, es habitual trabajar con mezclas de material virgen y reciclado en proporciones alrededor del 30% de material reciclado según la lectura. Esto permite mantener propiedades mecánicas aceptables al tiempo que se reduce significativamente el impacto ambiental.

Si lo comparamos con la tecnología FDM, el proceso FGF presenta un menor impacto ambiental global. En el primero, el uso de filamento implica una cadena de producción más larga, que incluye extrusión, enfriamiento, bobinado y transporte de material, cada etapa con su correspondiente consumo energético.

Además, el material reciclado debe cumplir requisitos estrictos de diámetro y homogeneidad para garantizar una alimentación adecuada. Sin embargo, el FGF tolera mejor las variaciones en los granos del material, ampliando el rango de residuos reutilizables.

No obstante, es importante considerar que el mayor consumo energético puntual de las extrusoras de pellets, debido a su tamaño y potencia, puede compensar parcialmente estas ventajas en determinadas condiciones. Aun así, en aplicaciones de gran volumen, el balance ambiental suele ser favorable al FGF.

6.3.3 POTENCIAL DEL FGF

El potencial de la tecnología FGF frente al FDM se manifiesta principalmente en aplicaciones donde el volumen de material y la eficiencia productiva son factores críticos.

En primer lugar, el uso de material reciclado posiciona al FGF como una alternativa especialmente atractiva dentro del contexto de la fabricación sostenible. Esta capacidad, combinada con el menor coste del material, permite reducir tanto el impacto ambiental como el coste por pieza.

A partir de los resultados experimentales obtenidos, se observan diferencias significativas en los parámetros de proceso y en el rendimiento entre ambas tecnologías. En el caso del FGF, las alturas de capa son considerablemente mayores (hasta 0,6 mm en primera capa), lo que permite incrementar la tasa de deposición. Asimismo, los anchos de extrusión alcanzan valores superiores (hasta 1,4 mm), lo que se traduce en una fabricación más rápida de geometrías de gran tamaño.

El FGF destaca en aplicaciones donde la precisión dimensional extrema no es prioritaria, pero sí lo son la rapidez en la deposición de grandes volúmenes y la reducción de costes. En este sentido, su potencial es especialmente relevante en sectores como la fabricación de prototipos a gran escala o componentes estructurales no críticos.

En conclusión, aunque el FDM continúa siendo la tecnología predominante en aplicaciones de alta precisión y bajo volumen, el FGF se posiciona como una alternativa con un alto potencial en entornos industriales, especialmente cuando se consideran criterios de sostenibilidad, coste y escalabilidad.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1 OBJETIVOS CUMPLIDOS Y APORTACIONES

El presente trabajo ha abordado la adaptación de una impresora de FDM de escritorio para la extrusión de material en forma de pellets en lugar de en filamento. Esta tecnología conlleva ventajas en costes, tiempo y contribuye a la economía circular, fundamental para el futuro de la impresión 3D. Más allá de esto, se han realizado diferentes ensayos en una impresora comercial de mayor formato, la PioCreat G5 Ultra, con el fin de definir y evaluar los parámetros óptimos de impresión.

A partir de los resultados, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- **Viabilidad de adaptación:** se ha demostrado que es posible adaptar una impresora FDM convencional para trabajar con pellets. Esto se hizo intercambiando el extrusor de filamento por el de pellets aprovechando la estructura de la impresora y modificando el código del firmware. De esta manera, se podía cambiar la configuración de la impresora para imprimir con FDM o FGF desde el menú. Esta adaptación permite aprovechar la infraestructura existente, reducir costes de material y aumentar la tasa de deposición en comparación con el FDM tradicional.
- **Parámetros de impresión:** se han podido determinar unos valores de impresión preliminares para el PLA y ABS en la impresora de gran formato, obteniendo piezas funcionales de una calidad aceptable. De esta forma, sabemos que un sistema FGF es capaz de producir objetos de gran tamaño y tasas de deposición bastante mayores, lo que supone un ahorro de coste y tiempo, pero que al mismo tiempo posee algunas limitaciones en el acabado superficial.

A pesar de los logros obtenidos, se ha visto que este tipo de impresión puede tener limitaciones que pueden condicionar a las piezas impresas. En cuanto al control del flujo, la inercia del pellet fundido puede causar alguna sobre extrusión y algunos defectos superficiales (*blobs*), sobre todo en la primera capa de impresión. En este caso, siempre será recomendable poner varias capas iniciales, de 3 a 4. Por otro lado, podrían mejorarse las

condiciones de la impresora añadiendo una caja alrededor de la misma, que actuase como cámara para mitigar los defectos de la primera capa. Los cuáles son causados por las diferencias grandes de temperatura entre cama, extrusor y temperatura ambiente. Además, este cerramiento podría ser de un material transparente tintado, de forma que no fuera necesario bajar la luminosidad de la sala al imprimir, lo que se hace para evitar las interferencias con el control por láser que tiene para su funcionamiento.

La calidad superficial, aunque aceptable, sigue siendo inferior a la obtenida mediante FDM, SLS o MJF debida a la naturaleza del sistema de impresión, es decir, a la dinámica del flujo del pellet y a la geometría del tornillo sinfín.

7.2 TRABAJOS FUTUROS

El trabajo realizado sienta una base sólida para continuar desarrollos y optimizaciones en impresión 3D por pellets. Entre las líneas futuras destacan:

- Optimización de la impresora de escritorio: se podría probar a imprimir con diferentes materiales como el ABS o el PLA con el fin de asegurar su correcto funcionamiento.
- Estudio extendido de parámetros de velocidad y temperatura para reducir *blobs* y mejorar la resolución. Con más tiempo, se podría intentar imprimir sin *spiral base*, para evaluar otros parámetros de impresión y la calidad estructural de la pieza, variando el número de perímetros y capas sólidas.
- Evaluación de la compatibilidad de la impresora de gran formato con otros materiales ya sean reciclados de PLA y ABS, o de materiales con aditivos, con el fin de determinar parámetros óptimos de impresión para estos casos.
- Evaluación de las propiedades mecánicas de piezas impresas con diferentes materiales.

7.3 CONCLUSIÓN

En conclusión, este trabajo ha demostrado la viabilidad de adaptar una impresora FDM de escritorio para la impresión con pellets, mediante la sustitución del extrusor de filamento por un sistema de extrusión de pellets y la modificación del firmware para permitir la alternancia entre ambas tecnologías según los requisitos de la aplicación. Esta adaptación permite aprovechar equipos existentes sin necesidad de reemplazarlos completamente, reduciendo costes y contribuyendo a una fabricación aditiva más sostenible y alineada con los principios de la economía circular.

Paralelamente, se realizaron ensayos de impresión con la impresora de gran formato PioCreat G6 Ultra, en los que se determinaron parámetros de impresión adecuados para materiales PLA y ABS, obteniendo piezas funcionales con una calidad aceptable para el análisis del comportamiento de los materiales y de la deposición mediante tecnología FGF.

Los resultados obtenidos muestran que la impresión FGF presenta ventajas significativas en términos de productividad, escalabilidad y reducción de costes frente al FDM convencional, alcanzando reducciones aproximadas de hasta un 35 % en la estimación de costes debido al material en forma de pellets y el menor tiempo de fabricación. Además, el uso de pellets reciclados refuerza el carácter sostenible de esta tecnología, favoreciendo el aprovechamiento de residuos plásticos y la reducción del desperdicio de material.

No obstante, también se identificaron diversas limitaciones asociadas al proceso FGF, especialmente relacionadas con la dinámica del flujo de pellet y el sistema de extrusión mediante tornillo sinfín. Entre ellas destacan problemas de sobre extrusión y aparición de blobs, principalmente en las primeras capas, así como una menor calidad en el acabado superficial respecto a sistemas FDM basados en filamento. Estos resultados evidencian que el control del flujo de material en FGF resulta más complejo y requiere una optimización más precisa de los parámetros de impresión.

En este sentido, se considera que el potencial de mejora de esta tecnología reside en la optimización de las condiciones térmicas mediante el uso de un cerramiento adecuado, así como en el ajuste de parámetros de temperatura, velocidad y caudal en el slicer. Todo ello permitiría ampliar la compatibilidad con otros materiales y mejorar la estabilidad del proceso de impresión.

Finalmente, en relación con la pregunta de investigación planteada sobre si el FGF supone el relevo generacional del FDM, se concluye que esta tecnología no debe entenderse como un sustituto directo, sino como una evolución complementaria orientada a aplicaciones donde la rapidez de fabricación, el bajo coste y el gran formato resultan prioritarios frente al acabado superficial. Por tanto, ambas tecnologías están llamadas a coexistir, ocupando nichos distintos dentro del ámbito de la fabricación aditiva.

Este trabajo establece una base sólida para futuras investigaciones orientadas a la optimización de parámetros de impresión con distintos materiales, incluyendo mezclas recicladas, así como al estudio comparativo de las propiedades mecánicas entre piezas fabricadas mediante FGF y FDM. El objetivo futuro será reducir la brecha de rendimiento entre ambas tecnologías para alcanzar, mediante sistemas FGF, niveles de calidad similares a los obtenidos actualmente con impresión por filamento.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

1. *Impresora 3D piocreat.* (s. f.). [Imagen]. <https://filament2print.com/es/pellets-lfam/2897-piocreat-g5ultra-impresora-3d-de-pellets.html>
2. *Piocreat G5Ultra—Impresora 3D de pellets.* (s. f.). Filament2Print. Recuperado 29 de diciembre de 2025, de <https://filament2print.com/es/pellets-lfam/2897-piocreat-g5ultra-impresora-3d-de-pellets.html>
3. *PioCreat G5 Ultra Granule 3D Printer | 3D Prima—3D-Printers and filaments.* (s. f.). Recuperado 29 de diciembre de 2025, de https://www.3dprima.com/3d-printers-more/3d-printer/filament-printers/piocreat-g5-ultra-granule-3d-printer_31218_14826
4. Rodríguez, J. R., & Calzado, M. J. (s. f.). *DISEÑO, FABRICACIÓN Y MONTAJE DE UNA IMPRESORA 3D (FDM).*
5. Guillermo. (2023, mayo 7). Qué es Klipper y cómo usarlo en tu impresora 3D. *A3Dprints*. <https://a3dprints.com/uncategorized/que-es-klipper-y-como-usarlo-en-tu-impresora-3d/>
6. Yehia, H. M., Hamada, A., Sebaey, T. A., & Abd-Elaziem, W. (2024). Selective Laser Sintering of Polymers: Process Parameters, Machine Learning Approaches, and Future Directions. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(5), 197. <https://doi.org/10.3390/jmmp8050197>
7. lectura, I. 3D G. 24 minutos de. (s. f.). *Guía de impresión 3D mediante sinterizado selectivo por láser (SLS).* Formlabs. Recuperado 12 de enero de 2026, de <https://formlabs.com/es/blog/que-es-sinterizado-selectivo->

laser/?srsltid=AfmBOorWEf3zmDPQUoVqUcK9nrhd360X-f34yz-

4_Je8k_FICpeTIM1r

8. Adach, M., Sokołowski, P., Piwowarczyk, T., & Nowak, K. (2021). Study on Geometry, Dimensional Accuracy and Structure of Parts Produced by Multi Jet Fusion. *Materials*, 14(16), 4510. <https://doi.org/10.3390/ma14164510>
9. Razavykia, A., Brusa, E., Delprete, C., & Yavari, R. (2020). An Overview of Additive Manufacturing Technologies—A Review to Technical Synthesis in Numerical Study of Selective Laser Melting. *Materials*, 13(17), 3895. <https://doi.org/10.3390/ma13173895>
10. Laminated Object Manufacturing of Thermoset Composites and Their Mechanical Characterization | Request PDF. (2025, diciembre 22). *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1115/MSEC2025-155871>
11. Saleh, A. M., Jaber, A. S., & Jabbar, M. S. (2025). Layer adhesion investigation of three dimension printed parts by controlling the environment temperature. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 19(3), 74-83. <https://doi.org/10.12913/22998624/197333>
12. Cano-Vicent, A., Tambuwala, M. M., Hassan, Sk. S., Barh, D., Aljabali, A. A. A., Birkett, M., Arjunan, A., & Serrano-Aroca, Á. (2021). Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects. *Additive Manufacturing*, 47, 102378. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102378>
13. Fontana, L., Giubilini, A., Arrigo, R., Malucelli, G., & Minetola, P. (2022). Characterization of 3D Printed Polylactic Acid by Fused Granular Fabrication

- through Printing Accuracy, Porosity, Thermal and Mechanical Analyses. *Polymers*, 14(17), 3530. <https://doi.org/10.3390/polym14173530>
14. Moreno Nieto, D., Casal López, V., & Molina, S. I. (2018). Large-format polymeric pellet-based additive manufacturing for the naval industry. *Additive Manufacturing*, 23, 79-85. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.07.012>
15. Liu, S., Zhao, P., Wu, S., Zhang, C., Fu, J., & Chen, Z. (2019). A Pellet 3D Printer: Device Design and Process Parameters Optimization. *Advances in Polymer Technology*, 2019, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2019/5075327>
16. Gupta, A. K., & Taufik, M. (2021). Effect of process variables on performances measured in filament and pellet based extrusion process. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5177-5184. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.508>
17. Woern, A. L., Byard, D. J., Oakley, R. B., Fiedler, M. J., Snabes, S. L., & Pearce, J. M. (2018). Fused Particle Fabrication 3-D Printing: Recycled Materials' Optimization and Mechanical Properties. *Materials*, 11(8), 1413. <https://doi.org/10.3390/ma11081413>
18. von Krogh, P. (2018). Direct pellet extruder developed for LEDC. 2018, 40. <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8932223&fileId=8932227>
19. ONU. (2015, septiembre 25). *Objetivos de desarrollo sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>

-
20. *Alimentador de pellets Mahor Feedstock Lite*. (s. f.). Recuperado 7 de enero de 2026, de <https://filament2print.com/es/accesorios/2709-alimentador-de-pellets-mahor-feedstock-lite.html>
21. Sapkota, A., Ghimire, S. K., & Adanur, S. (2024). A review on fused deposition modeling (FDM)-based additive manufacturing (AM) methods, materials and applications for flexible fabric structures. *Journal of Industrial Textiles*, 54, 15280837241282110. <https://doi.org/10.1177/15280837241282110>
22. Tina. (2025, julio 4). Pellets de PLA sostenibles: Una guía para bioplásticos ecológicos. *Salesplastics.com*. <https://salesplastics.com/es/pla-pellets/>
23. *Tereftalato de polietileno: ¿Qué es?, Usos y Propiedades*. (s. f.). Recuperado 5 de enero de 2026, de <https://www.envaselia.com/blog/tereftalato-de-polietileno-id12.htm>
24. DOAN, M. C. (2024, febrero 7). PETG Impresión 3D: Guía completa 2024. *Alveo3D*. <https://www.alveo3d.com/es/petg-filamento/>
25. *Polipropileno ¿Qué es? Ventajas y usos*. (s. f.). Recuperado 5 de enero de 2026, de <https://www.envaselia.com/blog/que-es-el-polipropileno-id13.htm>
26. *Extrusores de pellets: ¿Es posible mezclar pellets con aditivos directamente?* (s. f.). Filament2Print. Recuperado 5 de enero de 2026, de <https://filament2print.com/es/blog/filament2print.com/es/blog/extrusores-pellets-mezclar-aditivos>

ANEXO I

Código modificado del archivo *configuration.h* de Marlin para la impresora de escritorio:

```
// Custom Menu: Main Menu
#define CUSTOM_MENU_MAIN
#define CUSTOM_MENU_MAIN_TITLE "Extrusion Mode"
#define MAIN_MENU_ITEM_1_DESC "Perfil Filamento"
#define MAIN_MENU_ITEM_1_GCODE \
    "M92 E420\n" \
    "M203 X400 Y400 E50\n" \
    "M204 T500\n" \
    "M301 P20.06 I1.13 D87.3\n" \
    "M500"
#define MAIN_MENU_ITEM_2_DESC "Perfil Pellets"
#define MAIN_MENU_ITEM_2_GCODE \
    "M92 E725.2\n" \
    "M203 X120 Y120 E15\n" \
    "M204 T500\n" \
    "M301 P30 I2 D200\n" \
    "M500"
```