



# Diseño y desarrollo de una estación de validación para el análisis de un cabezal extrusor monohusillo para fabricación aditiva

A. González Muñoz<sup>1</sup>, A. Gimenez-El-Amrani<sup>2</sup>, Andres Sanz-Garcia<sup>3</sup>, C.Escobedo-Lucea<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad de Salamanca. [armandopeska@usal.es](mailto:armandopeska@usal.es)

<sup>2</sup> Laboratorio de Ingeniería Biomédica y Tisular (BTELab), Fundación de Investigación Hospital General Universitario de Valencia (FIHGUV). [gimenez\\_anu@gva.es](mailto:gimenez_anu@gva.es)

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Salamanca, [ansanz@usal.es](mailto:ansanz@usal.es)

<sup>4</sup> Laboratorio de Ingeniería Biomédica y Tisular (BTELab), Fundación de Investigación Hospital General Universitario de Valencia (FIHGUV). [escobedo\\_car@gva.es](mailto:escobedo_car@gva.es)

---

Los sistemas de fabricación aditiva (FA) basados en la extrusión de pellets termoplásticos se presentan como una alternativa prometedora para la producción de piezas a bajo costo y con mayor sostenibilidad, en comparación con el uso de filamentos convencionales. Son varias las ventajas que ofrecen debido al amplio número de termoplásticos que pueden ser extruidos a partir de su forma en pellets. Sin embargo, los cabezales de extrusión monohusillo y de doble husillo de pequeño volumen enfrentan desafíos técnicos significativos, particularmente en la medición de propiedades críticas como la presión y la velocidad, así como en la optimización de sus variables operativas de trabajo. Para abordar estas limitaciones, resulta esencial la implementación de sistemas de monitorización que permitan un análisis exhaustivo del comportamiento de los subsistemas que poseen los cabezales extrusores.

Para estudiar en profundidad el comportamiento del flujo polimérico en un extrusor de pellets para impresión 3D, se ha diseñado y desarrollado una estación de validación. Esta estación permite la monitorización en tiempo real, tanto directa como indirecta, de variables clave del sistema durante su operación, como la temperatura, la presión, el flujo másico y la velocidad, entre otras. Además de permitir estudiar el comportamiento de diferentes materiales poliméricos de una forma sencilla. Esto permite conocer y analizar el comportamiento del extrusor y facilita la configuración de los parámetros de impresión. Este trabajo presenta en detalle las distintas iteraciones en el proceso de diseño y fabricación de la bancada de pruebas, así como el código de programación implementado para recopilar datos de los sensores y controlar los actuadores de manera centralizada y automática. Utilizando este sistema se han podido medir las principales variables del proceso, obteniendo los parámetros óptimos para la impresión de materiales termoplásticos en un amplio rango de propiedades, así como el estudio de los sistemas de carga y refrigeración. Se han fabricado varios prototipos hasta lograr un modelo fiable, flexible y modular, facilitando cambios mecánicos para estudiar el comportamiento de distintos tornillos o parámetros tan relevantes como el espacio de la cámara de dosificación del extrusor.

El desarrollo de esta estación de validación puede constituir un aporte significativo para el análisis y la optimización de extrusores de tornillo en aplicaciones de FA. En trabajos futuros, se utilizarán los datos obtenidos con esta herramienta para validar varios modelos y simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) del proceso, facilitando avances en el diseño de cabezales de husillo más eficientes, mejorando así la reproducibilidad y calidad de los productos impresos en 3D.

---

## 1. Introducción

La fabricación aditiva (FA), también conocida como impresión 3D, ha transformado numerosos sectores [1], al permitir la producción eficiente y rápida de componentes con geometrías complejas sin la necesidad de moldes o herramientas de mecanizado costosas. Entre las diversas tecnologías disponibles, la extrusión de filamento fundido (FFF, por sus siglas en inglés) ha adquirido un papel destacado debido a su versatilidad, bajo coste operativo y capacidad para procesar una amplia variedad de termoplásticos. Sin embargo, la tecnología FFF requiere del uso de materiales en formato filamento, lo que limita su aplicación a polímeros que puedan ser trefilados para formar bobinas. Esta restricción excluye a muchos polímeros técnicos y de uso industrial que no pueden adaptarse a dicho proceso. Para ampliar la gama de materiales disponibles en FA, se han desarrollado estrategias como la combinación de polímeros con partículas o fibras [2], así como el uso de termoplásticos de alta flexibilidad, como elastómeros termoplásticos (TPE) o etilvinilacetato (EVA) [3], empleados comúnmente en procesos de moldeo por inyección. Sin embargo, aún es necesario profundizar en la investigación para optimizar estos materiales en el contexto de la impresión FFF, mejorando su procesabilidad, adhesión entre capas y propiedades mecánicas finales.

Los cabezales de impresión FFF presentan un diseño compacto y están compuestos, en su mayoría, por un sistema extrusor de engranajes y ruedas dentadas, un motor, un mecanismo de puente térmico y una zona de calentamiento del material. En el mercado se pueden encontrar cabezales específicos para termoplásticos convencionales, como PLA, ABS o PETG, así como versiones más avanzadas diseñadas para procesar materiales técnicos y abrasivos que contienen fibra de carbono, partículas metálicas o cerámicas [5]. La capacidad de estos cabezales para trabajar con materiales más exigentes depende de la resistencia de sus componentes a altas temperaturas y abrasión. Los extrusores utilizados en FFF pueden clasificarse en dos tipos principales: de extrusión directa y tipo Bowden. En los extrusores directos, el motor y el sistema de engranajes están integrados en el propio cabezal, lo que mejora el control del flujo de impresión y permite la extrusión de filamentos flexibles. En contraste, en los extrusores Bowden, el motor y los engranajes están separados del cabezal y generalmente montados en la estructura de la impresora, mientras que el bloque térmico y el puente térmico se ubican en el carro de movimiento. Esta configuración reduce el peso del cabezal en movimiento, optimizando la velocidad de impresión, aunque genera dificultades en la extrusión de materiales flexibles. A pesar de los avances en FFF y la optimización de sus cabezales de impresión, esta tecnología sigue presentando limitaciones, especialmente en la compatibilidad con ciertos materiales y en los costes asociados a la producción de filamentos. Estas restricciones han impulsado la búsqueda de alternativas más versátiles y accesibles, como la fabricación aditiva por extrusión asistida por tornillo (EAM), que elimina la necesidad del filamento y amplía significativamente el rango de materiales procesables.

La EAM permite la extrusión directa de materiales en formato de granza o pellets, lo que reduce el coste de la materia prima y amplía las posibilidades de experimentación con una mayor variedad de termoplásticos [4]. Además, facilita la incorporación de materiales no plásticos, como pastas cerámicas [5], y permite el uso de polímeros industriales en forma de pellets, los cuales son significativamente más económicos que los filamentos comerciales. Esta tecnología no solo optimiza la producción en términos económicos, sino que también favorece la sostenibilidad al permitir la utilización de materiales reciclados [6]. Los primeros sistemas experimentales de extrusión de pellets a pequeña escala se basaban en motores con tornillos verticales miniaturizados que reemplazaban el sistema convencional de filamento [6]. Estos extrusores consisten en un tornillo sin fin de paso y profundidad de canal constantes, alojado en un barril calefactado con una boquilla en su extremo para la salida del material fundido [7]. Desde su concepción, se han desarrollado variantes para optimizar el rendimiento, incluyendo unidades externas de alimentación, modificaciones en la geometría del tornillo (variaciones en el paso, profundidad de canal y diseño de la hélice), y la implementación de sistemas de doble extrusión con múltiples partes de alimentación [5]. También se han explorado configuraciones híbridas con pistones de empuje [5], y sistemas Bowden adaptados a la extrusión de pellets [8].

A pesar de sus ventajas, la extrusión de pellets enfrenta desafíos técnicos que deben abordarse para su implementación estandarizada en FA. Uno de los principales retos radica en la construcción robusta y precisa del cabezal extrusor, especialmente en sistemas mono y doble husillo, donde es fundamental controlar variables como la presión, el flujo másico y la velocidad de extrusión, particularmente al trabajar con termoplásticos de alta viscosidad o compuestos [4] [6]. Otra limitación importante es la variabilidad en el tamaño de los pellets y la dinámica del flujo, lo que afecta la calidad superficial y la resolución de las piezas, especialmente en extrusores de menor longitud [8]. Mientras que la tecnología FFF ha estandarizado el uso de filamentos, asegurando un alto nivel de precisión y calidad superficial [4] [6], la estandarización ha limitado la gama de materiales disponibles y dificultado la incorporación de cargas, mezclas o refuerzos en sectores como el automotriz o el aeroespacial [9]. La fabricación de filamentos introduce costes adicionales que podrían evitarse al trabajar directamente con pellets [6]. Pero para maximizar el potencial de la extrusión de pellets en FA es esencial desarrollar cabezales de extrusión con control preciso de las variables del proceso. Esto se consigue utilizando sistemas de monitorización avanzados y simulación numérica para optimizar la extrusión [10].

Los diseños de los extrusores están optimizados para mejorar el rendimiento en la extrusión y constan de varios componentes esenciales. La zona de alimentación es el punto de entrada del material, donde se deposita en una tolva o depósito superior. Existen variantes con alimentación activa, como sistemas por aire, que pueden afectar directamente la estabilidad del flujo de extrusión, generando variaciones de presión y caudal. El husillo de extrusión es el componente principal, responsable de transportar, comprimir y fundir el termoplástico mediante resistencias calefactoras. Su diseño varía según el material y la aplicación, siendo el ratio de compresión un parámetro clave. En este estudio se observa que un husillo con ratio de compresión elevado en impresión 3D dificulta el control del flujo de material. El barril calefactado contiene el polímero fundido y, junto con el husillo, lo guía hacia la boquilla de salida. Equipado con resistencias calefactoras y sensores de temperatura, su diseño influye en la inercia térmica del sistema, dependiendo del grosor del material con el que está fabricado. El sistema motriz se encarga de accionar el husillo y puede estar compuesto por motores con reductoras planetarias o mecanismos de engranajes lineales, diseñados para aumentar el torque y garantizar un funcionamiento estable. Por último, el sistema de refrigeración es esencial para controlar la temperatura en distintas zonas del extrusor. Debido al rozamiento y las inercias térmicas, la refrigeración es necesaria para evitar sobrecalentamientos y garantizar una extrusión uniforme y controlada.

Este trabajo presenta el diseño iterativo y desarrollo de una estación de ensayo y validación para el estudio del comportamiento del flujo polimérico en extrusores de pellets para impresión 3D. La estación evalúa el rendimiento de diferentes cabezales de extrusión, midiendo en tiempo real variables clave como temperatura, presión y flujo de material. Para ello, incorpora sensores y actuadores que permiten una caracterización detallada del proceso. Esta estación de validación se concibe como una herramienta fundamental para la verificación de resultados obtenidos mediante simulaciones numéricas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y Análisis por Elementos Finitos (FEM), impulsando mejoras en el diseño de sus componentes. Su diseño modular permite la prueba de distintas configuraciones de extrusión, incluyendo variaciones en tornillos, tolvas y mecanismos de dosificación, facilitando así la optimización del proceso. A través de este enfoque, se busca mejorar la reproducibilidad y calidad de las piezas impresas en 3D, al mismo tiempo que se fomenta el uso de materiales reciclados en FA, contribuyendo a una producción más sostenible y accesible.

## 2. Materiales y métodos

Para la construcción de la estación de validación y del cabezal extrusor de pellets, se seleccionaron diversos materiales metálicos y poliméricos en función de los requisitos mecánicos, térmicos y eléctricos de cada componente.

Para el diseño CAD y programación CAM se utilizó el Autodesk Fusion360 creando las diferentes iteraciones en los diseños de la estación de validación. La fabricación de piezas en aluminio se realizó en fresadora CNC Datron Neo+ de 4 ejes y con velocidad de mecanizado máxima de 40.000 rpm. El corte de perfiles de aluminio y brutos para mecanizado se realizó con una sierra de cinta para metal MG CY-355-A. La fabricación de componentes en acero mediante mecanizado convencional se realizó en torno Pinacho 256 con un metro entre puntos o fresadora Milko 35. La fabricación aditiva de componentes para los prototipos se llevó a cabo en impresora 3D Prusa MK3S+.

Como elementos metálicos se empleó aluminio serie 7000 de alta resistencia y baja dilatación térmica. Para piezas realizadas en acero se empleó acero F212 de fácil mecanizado e inoxidable AISI 303 con alta resistencia a la corrosión. Dependiendo de los requerimientos mecánicos y térmicos de cada pieza, se emplearon distintos materiales: PETG (Polietileno Tereftalato Glicol-modificado) de gran resistencia al impacto y estabilidad térmica; PLA (Ácido Poliláctico), adecuado para prototipos y piezas de baja exigencia mecánica; ABS, utilizado en piezas sometidas a esfuerzos moderados y temperaturas elevadas; y policarbonato (PC), empleado en aplicaciones que requieren alta resistencia mecánica y térmica.

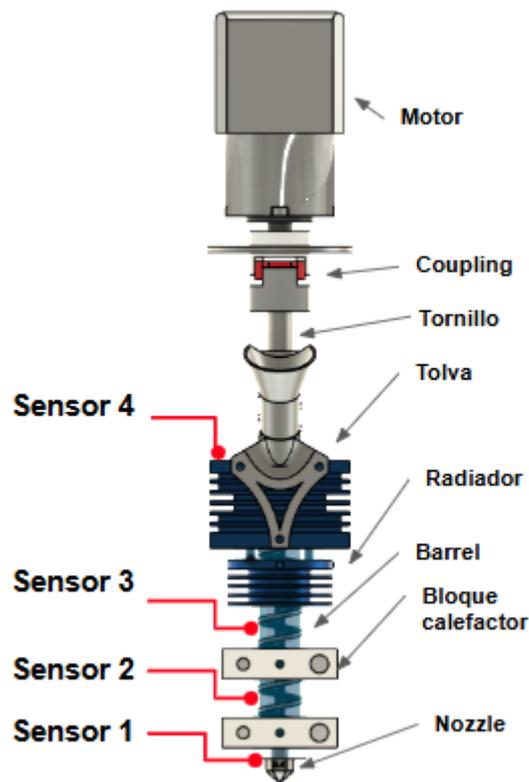
Los experimentos de validación y adquisición de datos del extrusor se han llevado a cabo utilizando Matlab y C++, adaptando la programación a los requerimientos experimentales de cada versión. Para la validación, el procedimiento se basa en la adquisición y procesamiento de datos mediante un sistema distribuido en tres unidades de adquisición, cada una de ellas encargada de diferentes mediciones. Una primera placa de adquisición de datos se encarga de la lectura y el tratamiento de la información de los termopares tipo K. Para ello, se utilizan las librerías del fabricante en C++, procesando los datos y enviándolos a través del puerto serie al ordenador. En Matlab, los datos se recopilan, se procesan y se representan gráficamente antes de su almacenamiento. El segundo Arduino se configura directamente con Matlab y emplea la librería del acondicionador HX711 para calibrar y registrar las mediciones de la célula de carga de 200 kg. Además, recibe la señal del sensor de barrera infrarrojo (IR), el cual, mediante un disco reglado solidario al eje del motor, genera pulsos que son leídos por Matlab para determinar la velocidad de giro del sistema de extrusión. Un tercer

Arduino se encarga de la adquisición de datos de la célula de carga de 1 kg, enviando la información al ordenador a través del puerto serie para su posterior tratamiento en Matlab.

El programa comienza con la configuración del puerto serie del ordenador, seguido de la inicialización del segundo Arduino junto con las librerías necesarias para la gestión de la célula de carga de 2kN y del sensor IR. Luego se realiza la calibración de ambas galgas extensométricas mediante pesos calibrados, asegurando la precisión de las mediciones, y se inicia la monitorización de la temperatura, indicando al usuario el inicio del proceso de calentamiento.

El acondicionamiento térmico del sistema está determinado por la temperatura de cuatro zonas del extrusor (Figura 1):

- **Zona 1 (Sensor 1):** Ubicada junto a la boquilla de extrusión, su temperatura debe coincidir con la temperatura de impresión del material en prueba, garantizando una deposición óptima y una correcta adhesión entre capas.
- **Zona 2 (Sensor 2):** Situada entre los bloques calefactores, su temperatura debe ser al menos 10°C inferior a la temperatura de impresión del material, evitando una fusión prematura y asegurando una transición térmica controlada.
- **Zona 3 (Sensor 3):** Ubicada justo debajo del radiador del extrusor, su temperatura debe mantenerse 50 °C por debajo de la temperatura de extrusión, evitando una fusión no deseada del material en la zona de disipación térmica.
- **Zona 4 (Sensor 4):** Situada en la tolva, en la zona de carga del material, su control térmico es crucial para evitar la adherencia prematura del polímero y posibles atascos. Debe mantenerse por debajo de la temperatura de reblandecimiento del material para garantizar un flujo continuo y estable.



**Figura 1:** Localización de los sensores de medida de temperatura y las diferentes partes del extrusor

Una vez alcanzada la temperatura programada, el sistema solicita al usuario el inicio del proceso de extrusión y la toma de datos de la masa del plástico extruido. Para minimizar los efectos del régimen transitorio, el registro de datos comienza cuando el extrusor ha alcanzado un estado estacionario y se han extruido un total de 2 g. De esta manera, los valores de temperatura, masa extruida y fuerza generada por la compresión del polímero son representativos y permiten una comparación más fiable con futuras simulaciones numéricas. El proceso de extrusión se mantiene activo hasta alcanzar un total de 10 g de material extruido. En ese momento, los datos son

procesados y almacenados, junto con las gráficas correspondientes. Posteriormente, se mide la velocidad de extrusión, lo que permite completar la prueba. Para verificar la precisión de los datos registrados, se realiza un pesaje final del material extruido en balanza de precisión, estableciendo el valor del flujo másico de salida. Los datos de salida restantes son las temperaturas de equilibrio térmico del extrusor y la presión en la punta del tornillo.

### 3. Resultados y discusión

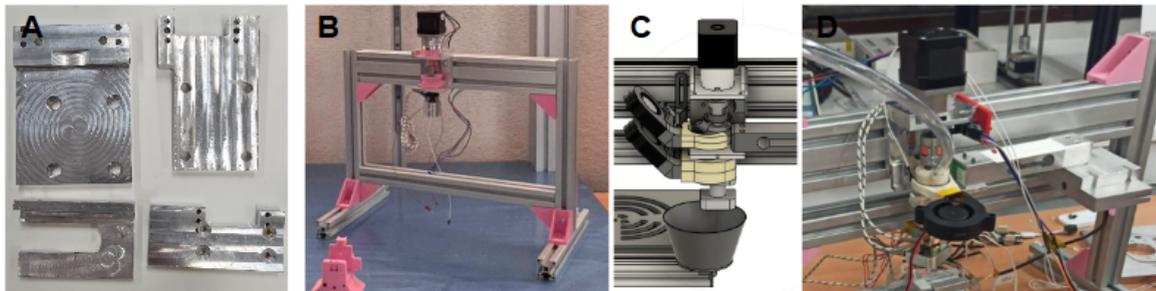
#### 3.1. Desarrollo de la estación de validación

En la literatura [3-5], los sistemas industriales de extrusión horizontal están encargados de fundir y depositar el material termoplástico de manera controlada. Existen unas pocas variantes, pero en general se componen de las mismas partes y sistemas. Estos sistemas horizontales de extrusión de pellets de tamaño industrial son bien conocidos. En el caso de realizar modificaciones sustanciales en su tamaño y finalidad, se pueden generar incertidumbres. Estos problemas son comunes cuando se traslada un diseño de una gran máquina en posición horizontal para grandes flujos másicos de termoplástico a un sistema mediano/pequeño en posición vertical y de deposición controlada. En total se han realizado tres versiones de la estación de validación con sucesivas mejoras estructurales y funcionales comprobadas mediante pruebas de laboratorio y análisis de desempeño.

##### 3.1.1. Estación de validación versión 1 (V1)

En la estación de validación V1, la estructura se diseñó con un pórtico fabricado en aluminio extrusionado de 30 x 30 mm tipo I, ensamblado con tornillería M4 y tuercas tipo I. Para aumentar la rigidez, se incorporaron escuadras de ABS fabricadas mediante impresión 3D. Los soportes del barrel, el motor y las células de carga se mecanizaron en aluminio de la serie 7000 mediante procesos CNC y convencionales, permitiendo su instalación mediante tornillería M4.

Como sensores se utilizaron dos células de carga de 20 kg (CZL601) y 1 kg (TAL220) para medir la presión y el peso del material extruido, respectivamente. El acondicionamiento de señal se realizó a través de un driver HX711. Cuatro termistores NTC (100K 3950) se instalaron para monitorización térmica a lo largo del barrel y la tolva. La adquisición de datos (temperatura, fuerza, velocidad y peso) se realizaba mediante un Arduino Nano montado en una placa de prototipado rápido, con procesamiento de datos en MATLAB. Para el control del motor y las resistencias calefactoras, se utilizó una placa de desarrollo Cheetah 2.0 junto con una Raspberry Pi 3, permitiendo la implementación del firmware Klipper, ampliamente utilizado en impresión 3D.

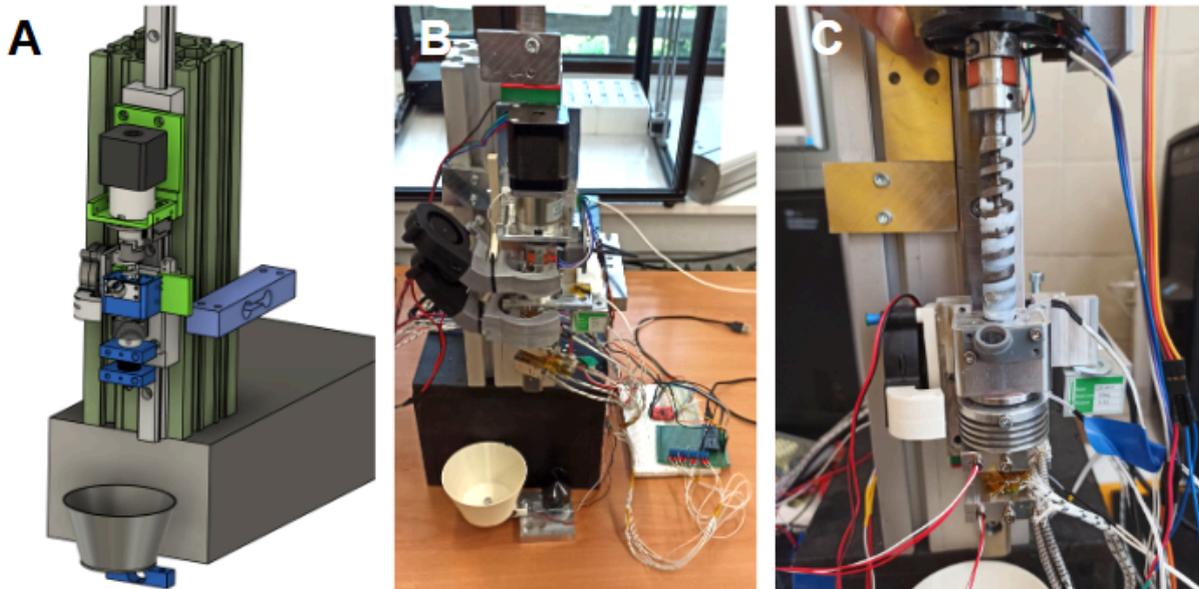


**Figura 2:** A) Soportes del cabezal mecanizado por CNC; B) Estructura principal de la versión V1; C) Modelo CAD de la versión V1; D) Montaje completo de las versiones V1 y la versión V1ex

##### 3.1.2. Estación de validación versión 2 (V2)

La versión V2 incluyó mejoras estructurales para mejorar la estabilidad y minimizar vibraciones, utilizando perfiles de aluminio estructural tipo I de 90x90 mm. La estación se montó sobre una plataforma elevada para mejorar la ergonomía y la sujeción del perfil. Para facilitar el desplazamiento con precisión de todos los componentes, se incorporó una guía lineal de 20 mm con dos patines de bolas recirculantes (HGH20).

Se mantuvieron las células de carga de 200 N y los termistores de la versión V1 conectados al Arduino Nano para la adquisición de datos y se añadió un sensor de barrera infrarroja (IR) para medir la velocidad de giro del motor.

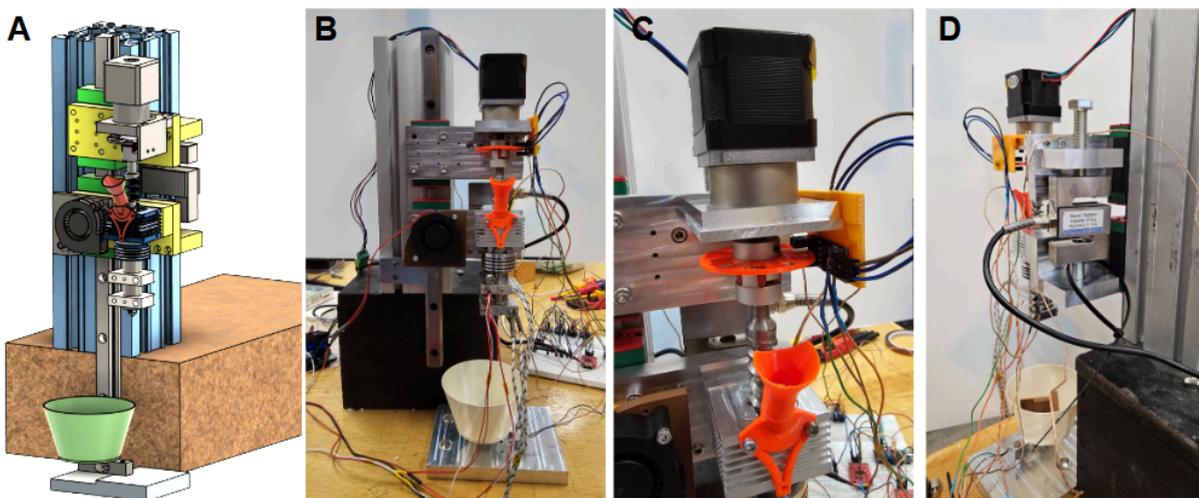


**Figura 3:** A) Dibujo CAD de la estación versión V2; B) Montaje completo de la estación versión V2 C) Limpieza del tornillo en la versión V2 de la estación.

### 3.1.3. Estación de validación versión 3 (V3)

En la tercera versión (V3) se sustituyó la célula de carga de 200 N por una de 2 kN, pero manteniendo el driver HX711. Este cambio exigió el rediseño de los soportes del motor y el barrel fabricados en aluminio para integrar correctamente la nueva célula de carga.

La disposición de los sensores se cambió a la zona lateral para facilitar su montaje y se mejoró la precisión en la medición de la temperatura reemplazando los termistores por termopares tipo K. El acondicionamiento de señal se gestionó con el driver MAX31855. La capacidad de adquisición de datos se amplió con la integración de tres placas Arduino Nano para distribuir la gestión de las medidas de los sensores y reducir la velocidad.



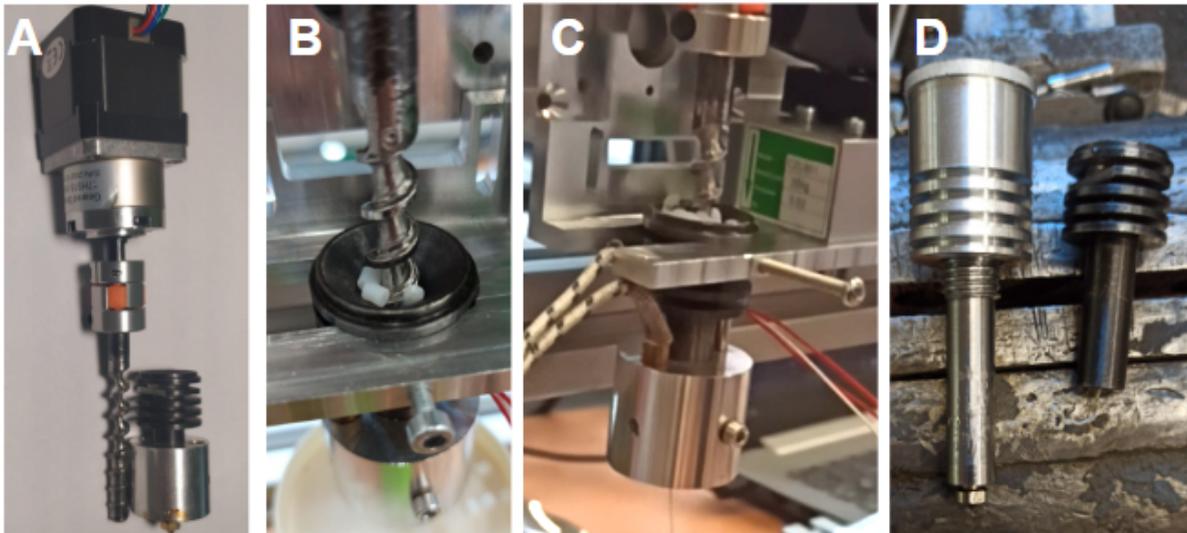
**Figura 4:** A) Modelo CAD de la estación V3; B) Montaje completo de la estación V3; C) Imagen de detalle del sensor IR instalado en la estación; D) Imagen del montaje de la nueva célula de carga de 2 kN.

## 3.2.Desarrollo del cabezal de extrusión de pellets

El cabezal extrusor, al igual que la estación de validación, ha pasado por varias versiones hasta llegar a su diseño final.

### 3.2.1. Cabezal extrusor versión 1 (V1)

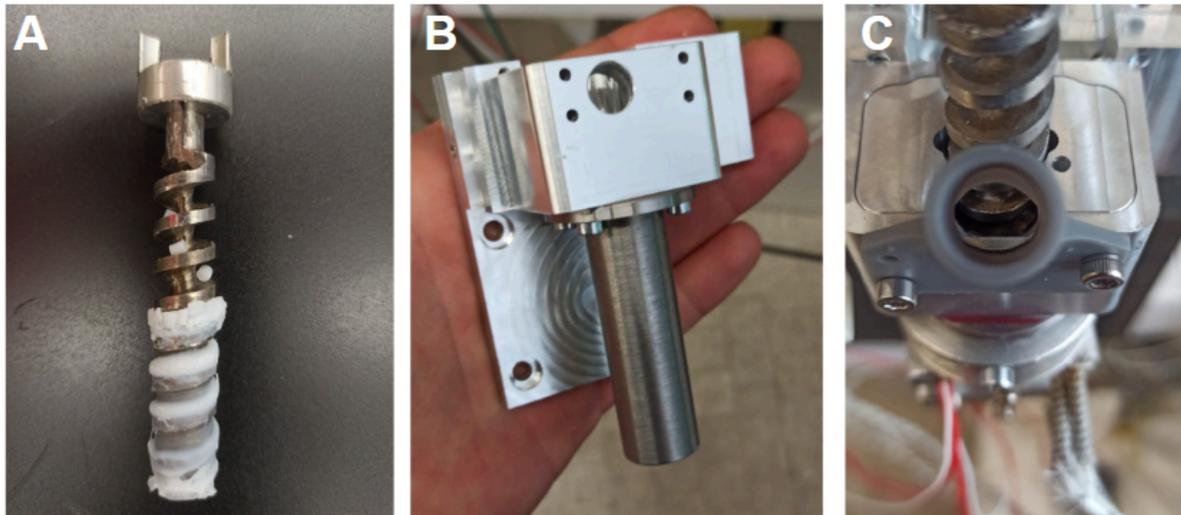
En la primera versión, el extrusor estaba compuesto por un barrel de acero endurecido con un diámetro exterior de 12 mm y una longitud de 55 mm. Incorporaba un estriado de 20 mm de longitud y 25 mm de diámetro que actuaba como radiador. En su extremo de salida, tenía una rosca M6 para acoplar una boquilla. El tornillo extrusor, también fabricado en acero endurecido, tenía un diámetro de 8 mm y una longitud de 62 mm, con un canal de 1.75 mm de profundidad en la zona de alimentación. Su diseño incluía un alma variable con un ratio de compresión de 1.38 y un paso constante. Para la calefacción, se implementó un bloque cilíndrico de aluminio con dos orificios que alojaban un cartucho calefactor de 70 W a 24 V y un sensor de temperatura PT1000. Como sistema motriz, se utilizó un motor Nema 17 de 1.58 A con una reductora planetaria de 1:5 y un coupling. La refrigeración se realizaba mediante un ventilador de turbina a 24 V.



**Figura 5:** A) Montaje del motor coupling y tornillo B) Problemas carga de material C) Extrusor en funcionamiento D) Variante del extrusor V1ex

### 3.2.1. Cabezal extrusor versión 2 (V2)

En la segunda versión se diseñó y fabricó un tornillo extrusor de 80 mm de longitud y 14 mm de diámetro (Figura 6A), con un paso constante y alma variable (ratio de compresión: 2). Se amplió el canal de alimentación a 5 mm de profundidad para permitir el uso de pellets de mayor diámetro. El barrel se mecanizó en acero F212, con un diámetro exterior de 18 mm y una longitud de 60 mm incluyendo una brida en un extremo de 25 mm de diámetro y 3 mm de espesor con cuatro orificios para tornillos M3 (Figura 6B), mientras que en el otro extremo se mecanizó una rosca M6 para acoplar la boquilla. Para mejorar la alimentación, se diseñó y mecanizó una tolva de carga frontal en aluminio. Se fabricó un radiador cilíndrico de diámetro 30 mm y de longitud 20 mm con múltiples aletas para disipación térmica. Se añadieron dos bloques de aluminio mecanizado con sendas resistencias calefactoras de 70 W a 24 V alojadas junto a los correspondientes sensores PT1000.



**Figura 6:** A) Tornillo extrusor V2ex; B) Barrel, tolva y soporte mecanizado; C) Versión mejorada de tolva

### 3.2.1. Cabezal extrusor versión 3 (V3)

En la tercera versión se mantuvo el barrel de acero y sus dimensiones, pero se mecanizó un nuevo tornillo extrusor de igual paso y profundidad, eliminando así la capacidad de compresión. Los bloques calefactores se mantuvieron y se reemplazó el motor por un Nema 17 de 1.5 A con reductora planetaria de 1:14.

## 3.3. Desarrollo funcional de la estación de validación y el cabezal extrusor

El desarrollo de la estación de validación ha estado estrechamente vinculado a la evolución del cabezal extrusor. Por ello, se describe a continuación la correlación que existe entre los cambios realizados en las tres versiones. Esto es debido a que cada iteración del extrusor ha requerido ajustes en la estación para optimizar su funcionamiento. En los siguientes párrafos se detallan las versiones más relevantes de la estación y su extrusor correspondiente.

La primera dupla de diseño, estación de validación V1v + cabezal extrusor V1ex (Figuras 2 y 5), tuvo el objetivo de buscar el mismo comportamiento de un cabezal extrusor disponible comercialmente. Este extrusor constaba de un barrel con radiador incorporado y un tornillo extrusor de 8 mm de diámetro con paso constante y alma variable. Se escogió esta tipología de extrusor por optimizar y reducir en mayor medida el peso y las dimensiones del cabezal extrusor. Una minimización del peso produce menos problemas de vibraciones durante el proceso de impresión 3D. El bastidor utilizado fue tipo pórtico, utilizando perfiles de aluminio 30x30 mm, con uniones mediante escuadras para mejorar la rigidez estructural. Los componentes sometidos a mayores esfuerzos mecánicos y térmicos, como los soportes del barrel, motor y células de carga, fueron fabricados en aluminio. El extrusor era accionado por un motor Nema 17 con reductora 1:5, conectado al tornillo mediante un coupling. Para el calentamiento, se fabricó un bloque en aluminio, donde se instaló el sensor de temperatura y el cartucho calefactor. El barrel (Figura 4B) contaba con hendiduras mecanizadas para alojar termistores, permitiendo una monitorización precisa de la distribución térmica. Para evitar la fusión prematura del polímero en la zona de carga, se integró un difusor de aire impreso en 3D, diseñado para optimizar la circulación del flujo de aire generado por un ventilador. Se incorporó una célula de carga de 1 kg en la parte inferior de la estructura, con un recipiente impreso en 3D para recoger el material extruido. Para medir la fuerza axial del extrusor, se diseñó un soporte de aluminio que permitía una fácil extracción del barrel y la fijación de una célula de carga de 200 kN (Figura 4C).

Las pruebas realizadas con esta primera versión no fueron satisfactorias, debido a múltiples problemas en el extrusor y en la propia estación de validación, con datos poco representativos. El canal del tornillo extrusor presentaba dimensiones insuficientes, generando atascos para procesar pellets de diferentes tamaños, lo que ocasiona bloqueos y discontinuidades en la alimentación del material. Una falta de rigidez estructural generaba vibraciones que afectan las mediciones de fuerza. La estructura no era lo suficientemente robusta como para soportar los atascos que producían los pellets. El soporte fabricado para el barrel carecía de suficiente robustez para mantener la linealidad del eje del tornillo con el del motor. La tolva no permitía una carga óptima: Se ocasiona que el material de alimentación no es empujado por el tornillo debido a que la tolva no ofrece resistencia al material.

En segundo lugar, se desarrolló una nueva dupla de estación-extrusor con características más versátiles y optimizadas para la fabricación aditiva con pellets de características industriales. Para ello, se diseñó y fabricó un tornillo extrusor, con un diámetro de 14 mm y una longitud de 85 mm, y se mantuvo un paso constante. El alma variable se mantiene siguiendo la literatura, y otros extrusores de mayor tamaño comercial poseen tornillos con alma variable. Para optimizar la carga de material y facilitar la limpieza, se diseñó un barrel desmontable, atornillado a una tolva de carga frontal fabricada en aluminio, facilitando el acceso al interior y la alimentación del material. Además, se incorporaron hendiduras estratégicamente distribuidas en el barrel, destinadas a alojar los termistores. Se dividió el sistema de calefacción, mediante dos bloques de aluminio, para integrar resistencias calefactoras y los sensores, garantizando una distribución homogénea del calor. Estos cambios dieron como resultado una versión más robusta, eficiente y potente del extrusor (V2ex), con mejoras significativas en la estabilidad térmica y la capacidad de extrusión. Para probar el extrusor (V2ex), se diseñó y fabricó una versión actualizada de la estación (V2v), con mejoras estructurales y mecánicas que permitieran una evaluación más precisa del desempeño del sistema. La nueva versión incorporó un pilar de aluminio extruido de 90x90 mm, montado sobre una plataforma, lo que proporcionó mayor robustez y simplicidad en el montaje de los componentes necesarios. Para garantizar una alineación precisa y minimizar desviaciones en la extrusión, se integró una guía lineal de 25 mm con dos patines de bolas recirculantes, los cuales actuaban como soporte para el desplazamiento generado por la presión del tornillo extrusor. Esta mejora no solo permitió una mejor estabilidad mecánica durante la extrusión, sino que también facilitó el posicionamiento y limpieza de los componentes.

En términos de soporte y fijación, para la dupla V2v - V2ex se rediseñaron los soportes del motor y del barrel, fijándolos de manera independiente a los patines de la guía lineal. Además, se rediseñaron los soportes del sistema de refrigeración y la célula de carga de 20 kg, optimizando su disposición para evitar desviaciones en la medición de fuerza. Se prestó especial atención a la ubicación de la célula de carga de 20 kg, asegurando que no generara un momento respecto a su eje, lo que permitió obtener mediciones más realistas. Asimismo, la célula de carga encargada de medir el peso del material extruido se separó de la estructura principal para evitar perturbaciones indeseadas en los datos registrados. En cuanto a los sistemas de medición y control, se mantuvieron los sensores de temperatura y el motor de la versión anterior, lo que permitió realizar pruebas de validación sin necesidad de modificaciones en el sistema electrónico. Los resultados obtenidos con la (V2v) mostraron una mejora significativa en comparación con la versión anterior. Sin embargo, el sistema presentaba diferentes problemas, tales como la extrusión descontrolada debido a una variación de la presión, debido a la excesiva compresión del tornillo o la discontinuidad en la alimentación. Por último, en las pruebas con carga se observaron muchas irregularidades en la temperatura de extrusión. Debido a la deficiente extrusión, se necesitaba aumentar la temperatura para poder extruir. Este exceso de temperatura favorece la extrusión, pero degrada en mayor medida el material. Estos problemas evidenciaron la necesidad de nuevas modificaciones en el diseño, lo que llevó al desarrollo de una tercera iteración de la estación de validación y del extrusor.

La versión (V3ex) redujo los problemas de cargas y se aumentó de potencia el motor con una reductora 1:14. Se rediseñó la tolva y se generó una serie de ranuras longitudinales. Se fabricó otro tornillo extrusor en acero inoxidable, manteniendo las mismas características pero eliminando el ratio de compresión. En definitiva, se resuelven los problemas de extrusión descontrolada y el exceso de atascos.

La nueva versión del extrusor obligó a modificar la versión de la estación (V2v) y pasar a la versión (V3v). Además, se cambió la célula de carga de 200 N por otra de 2 kN. Para instalar la nueva célula, se tuvo que rediseñar por completo los soportes del barrel y del motor, desplazando el montaje del extrusor a la derecha para facilitar la instalación y así poder ajustar las alturas de trabajo del extrusor. Por último, los termistores fueron sustituidos por termopares tipo K con un circuito acondicionador MAX31855.

### **3.4. Mediciones obtenidas con la estación de validación**

Utilizando las diferentes versiones de la estación de validación y de los cabezales de extrusión desarrollados, se llevaron a cabo múltiples pruebas experimentales con el propósito de evaluar y comparar el desempeño de los distintos prototipos. El objetivo final de estas pruebas fue establecer las condiciones óptimas que, en trabajos futuros, permitan utilizar la estación para validar simulaciones numéricas del tornillo extrusor.

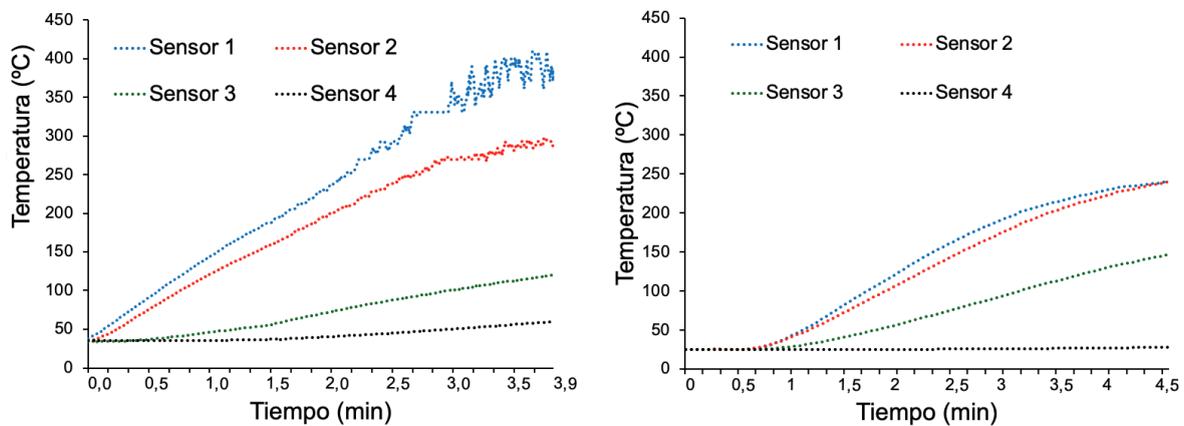
Las pruebas iniciales realizadas con la primera versión del cabezal extrusor (V1ex) y la estación (V1v) no fueron satisfactorias. Los pellets de HIPS presentaban un tamaño muy variado y excesivo para alojarse adecuadamente en el paso del tornillo. Además, la dureza de este polímero superaba el par que el motor Nema 17 con reductora 1:5 podía proporcionar, lo que provocó atascos y la imposibilidad de obtener datos válidos. Otro problema identificado fue la falta de robustez en la interfaz entre el barrel y su soporte, lo que dificultaba la alineación con el husillo y afectaba la estabilidad del sistema frente a fuerzas y vibraciones. La disposición de la célula de carga de 200 N generaba un momento respecto al punto de anclaje, introduciendo errores en la medición de fuerzas. Adicionalmente, el contacto directo entre esta célula de carga y el soporte del barrel incrementaba su temperatura, lo que prolongaba el tiempo necesario para alcanzar un estado térmico estable. A esto se sumaba la

presencia de vibraciones en la estructura, que afectaban directamente a la célula de carga de 1 kg encargada de medir el material extruido, generando oscilaciones en sus lecturas. Como consecuencia de estas deficiencias, no fue posible obtener mediciones representativas en esta primera versión.

La segunda versión de la estación (V2v) presentó mejoras significativas respecto a la versión inicial. La incorporación de un sistema de guía lineal permitió mantener la alineación del tornillo con el barrel. La nueva disposición de la célula de carga de 200 N eliminó interferencias en el desplazamiento del sistema. El rediseño de la zona de entrada, junto con la implementación de un nuevo tornillo, mitigó los problemas de atascos causados por el tamaño del pellet, pero para poder obtener una extrusión continua, se debía de aumentar la temperatura en exceso. Asimismo, la separación de la célula de carga de 1 kg respecto a la estructura eliminó por completo las interferencias debidas a vibraciones. A pesar de estas mejoras, los datos obtenidos en relación con la temperatura no eran representativos debido al exceso de consigna y el ruido captado en ciertos intervalos, las fuerzas que se producían en el sistema sobrepasaba la capacidad de la célula de carga de 20 kg. Para mitigar estos problemas, fue necesario aplicar un procesamiento posterior a los datos adquiridos, eliminando valores atípicos y filtrando los resultados con el fin de obtener mediciones más representativas y consistentes. También se identificó que el ratio de compresión del tornillo extrusor era demasiado elevado, lo que resultó en una extrusión excesiva e incontrolada del material cuando el motor se detenía.

La tercera versión de la estación (V3v) ha permitido obtener mejores resultados que en la versión V2v. La incorporación de una célula de carga de escala muy superior a las fuerzas que se generan en el sistema de extrusión permite poder medir la fuerza reduciendo los desplazamientos en la misma. El aumento del par motor permitió reducir los continuos atascos de la versión V2, aunque sigue siendo el causante de los datos tan elevados en las gráficas de la fuerza debido a que en ocasiones se interpone el material entre el filete del tornillo y la tolva. La incorporación de una tolva ranurada ha eliminado el problema de la discontinuidad de la carga. Esto se ve favorecido por un tornillo extrusor con una profundidad de canal adecuada para el tamaño de los pellets. Así mismo, la eliminación del ratio de compresión hace que el sistema sea más estable y lineal.

En la Figura 7 se presentan los resultados obtenidos durante el proceso de calentamiento del cabezal extrusor hasta alcanzar una temperatura de consigna de 240 °C, medida mediante la sonda ubicada en la zona 1, junto a la boquilla de extrusión (Sensor 1). Se comparan los datos obtenidos para las versiones V2 y V3 del cabezal de extrusión junto con la estación de validación correspondiente, permitiendo evaluar las diferencias en el desempeño térmico de ambos sistemas.



(A) Gráfica de precalentamiento extrusor V2ex

(B) Gráfica de precalentamiento extrusor V3ex

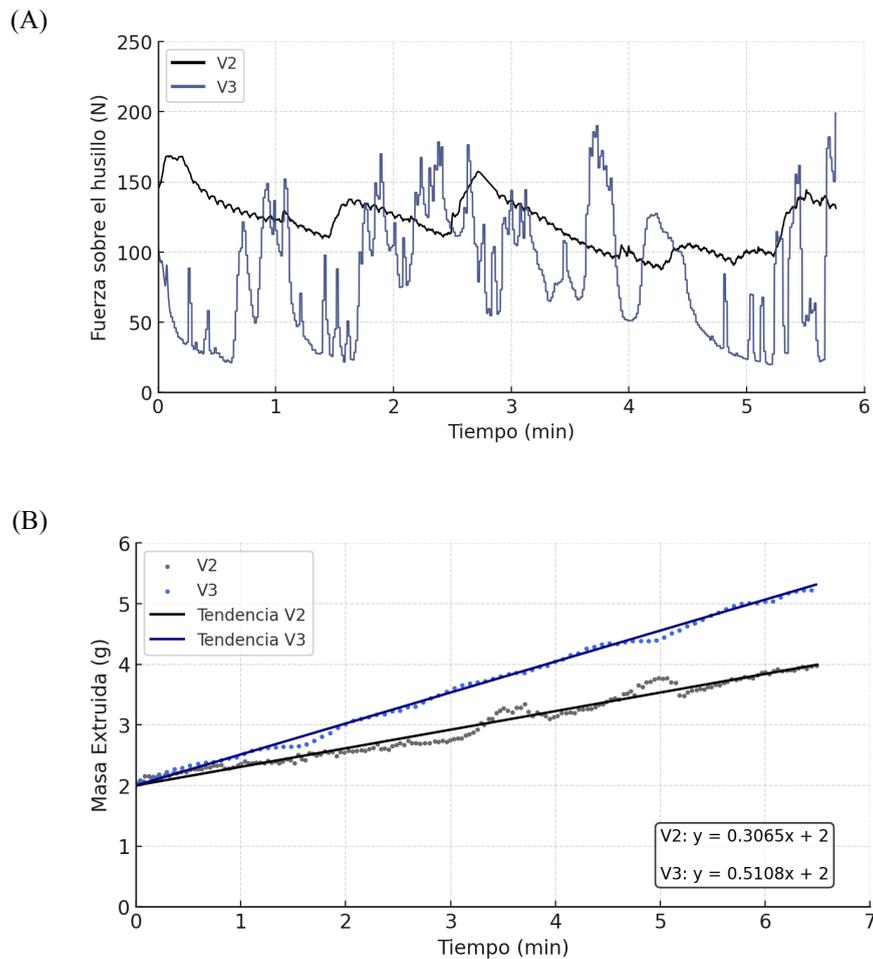
**Figura 7:** Resultados de las medidas de temperatura de los sensores de los extrusores

La versión 3 del cabezal extrusor (V3ex) presenta un calentamiento más controlado. Con una mayor inercia del sistema, el tiempo de calentamiento fue un poco más elevado en la versión V2. El sistema de refrigeración y el disipador de la V3 actúan sobre el sensor 4 y disipan mejor el exceso de calor. La consigna de temperatura se situó en 240 °C, en la versión V2 se tuvo que aumentar para poder realizar una extrusión continuada. En cambio, en la versión V3 con la temperatura de impresión del material HIPS no presentó problemas de extrusión.

La diferencia de tiempo en lograr la temperatura deseada se debe a una mayor disipación por la nueva tolva y el mayor tamaño del radiador.

Los cambios realizados en la versión V3, permiten realizar una extrusión con la temperatura adecuada del material, con un calentamiento más controlado.

La Figura 8 presenta una comparación de la fuerza ejercida sobre el tornillo extrusor debido a la compresión generada en el flujo polimérico durante la extrusión, para las versiones V2 y V3 del extrusor y la estación de validación.



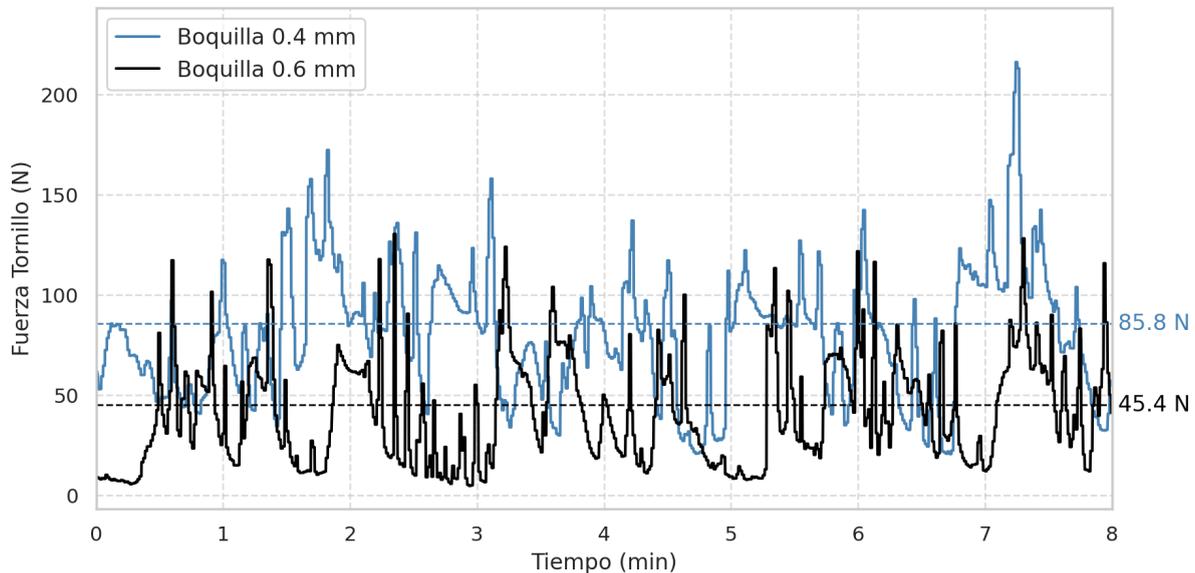
**Figura 8:** (A) Evaluación de la fuerza de empuje ejercida por el tornillo durante el proceso de extrusión en las versiones V2 (línea negra) y V3 (línea azul). (B) Evolución del flujo de masa extrusionada en función del tiempo de extrusión en las versiones V2 (línea negra) y V3 (línea azul).

En la Figura 8 se observa que la fuerza promedio en la V3 es menor que en la V2. Esto es debido a que se ha eliminado el ratio de compresión del tornillo y, por lo tanto, se intuye que existe un transporte del material con menor resistencia y probablemente más eficiente que evita la acumulación excesiva de presión en el sistema. Esta reducción en la fuerza era previsible dado que en la versión V3 se eliminó el ratio de compresión del tornillo. Esta diferencia tuvo un impacto significativo en la calidad y continuidad de la extrusión del material durante las pruebas del V3. En resumen, la presión promedio fue mayor en V2 y esto provocó problemas de sobreextrusión, incluso en los instantes en los que el husillo no estaba en movimiento. Se observó la generación de un flujo no controlado de material, y dicho flujo no se detenía incluso una vez que se paraba el sistema de extrusión. Por otro lado, se observa que la fuerza en la V2 presenta menos picos; esto es debido al desplazamiento que permite la célula de carga de 200 kN al interferir el pellet con el filete del tornillo. Este fenómeno no sucede en la versión V3 donde el sistema es más rígido y no permite que el tornillo se desplace al interferir el material, aumentando bruscamente la fuerza hasta que rompe el material. Por tanto, y aunque la V3 muestra una mayor variabilidad en la salida, su menor presión media y la nula movimiento del tornillo, mejora el rendimiento del extrusor y la calidad final de impresión. Para optimizar el sistema de medida, sería recomendable medir la presión mediante un sensor en la punta del extrusor, eliminando las perturbaciones que genera la zona de alimentación.

En la Figura 9 se presenta una comparación del flujo másico medido en los prototipos V2 y V3 a partir de la masa de plástico extruida durante los ensayos. La mejora en el sistema de alimentación de pellets implementada en la versión 3 permitió incrementar el flujo másico en un 66%, permitiendo mayores velocidades de impresión,

esto se debe a una mejora en el proceso de extrusión, con una alimentación más constante y sin perturbaciones en el correcto funcionamiento.

Con el objetivo de evaluar posibles mejoras en el desempeño del cabezal de extrusión, se implementó el uso de boquillas de diferentes diámetros en la versión V3 para reducir la fuerza ejercida sobre el tornillo de extrusión durante la impresión. En la Figura 10 se presentan los resultados de fuerza medidos durante los ensayos para boquillas de 0.4 mm y 0.6 mm, permitiendo comparar su impacto en el proceso de extrusión.



**Figura 9:** Captura ilustrativa del formato de imagen.

La gráfica muestra que el uso de una boquilla con un diámetro 0.2 mm mayor reduce casi a la mitad la fuerza sobre el tornillo de extrusión (45.4 N frente a 85.8 N en promedio), lo que contribuye a una extrusión más estable y uniforme, reduciendo el riesgo de sobrepresión o atascos. Por el contrario la boquilla de 0.4 mm puede ofrecer mayor precisión en la impresión, la de 0.6 mm permite un flujo más alto de material con una carga menor mecánica sobre el sistema.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló y optimizó una estación de validación junto con un cabezal de extrusión de pellets para evaluar experimentalmente el comportamiento del flujo másico de extrusión de distintos materiales. El sistema ayudará a comparar los resultados experimentales obtenidos con una serie de materiales y las potenciales simulaciones numéricas. Para optimizar el proceso de extrusión de pellets en fabricación aditiva, es fundamental desarrollar y validar cabezales de extrusión que permitan un control preciso de las variables del proceso. A través de un enfoque iterativo, se implementaron mejoras estructurales y funcionales que aumentaron la estabilidad del sistema, la precisión en la medición de variables clave y la eficiencia térmica y mecánica del proceso de extrusión. Las principales conclusiones de este trabajo se resumen a continuación:

- La versión 3 del extrusor V3v mejoró significativamente el desempeño del sistema, reduciendo la fuerza sobre el tornillo de extrusión y evitando problemas de sobrepresión y sobre extrusión observados en las versiones anteriores.
- La optimización del sistema de alimentación de pellets permitió aumentar el flujo másico en un 66%, posibilitando mayores velocidades de impresión sin comprometer la estabilidad.
- El uso de una boquilla de 0.6 mm en lugar de 0.4 mm redujo casi a la mitad la fuerza sobre el tornillo, mejorando la estabilidad de extrusión y reduciendo el riesgo de atascos.

- Se incorporaron mejoras en la adquisición de datos, como células de carga de mayor capacidad y termopares tipo K, aumentando la precisión de las mediciones térmicas y de fuerza y mejorando la robustez del sistema.
- El desempeño térmico de la V3 fue ligeramente inferior, pero necesita una temperatura inferior para extrusionar el material cargado en el tornillo.
- A pesar de las mejoras, se observó una mayor variabilidad en la fuerza debido a la fractura de pellets durante la carga de material, lo que sugiere la necesidad de optimizar el sistema de alimentación, aumentar la fuerza del motor e implementar un sistema de medición en la punta del tornillo.

Las pruebas realizadas con la versión (V3v) del extrusor arrojaron datos y pruebas de extrusión resultados satisfactorios, los cuales se compararán en trabajos futuros con los resultados de las simulaciones mediante COMSOL.

## 5. Referencias

- [1] Haleem, A., Javaid, M., "Impact of additive manufacturing in different areas of Industry 4.0", *International Journal of Logistics Systems and Management*, vol. 37, no. 2, pp. 225–238, 2020.
- [2] Gonçalves C., Carneiro O.S., "Design and validation of an innovative 3D printer containing a co-rotating twin screw extrusion unit (Co-TSE)", *Additive Manufacturing*, vol. 59, p. 103143, 2023.
- [3] Slonov, A., Musov, I., Zhansitov, A., Khashirov, A., Tlupov, A., Musov, K., Rzhhevskaya, E., Fomicheva, I., Potapov, A., Khashirova, S., "Investigation of the Properties of Polyethylene and Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer Blends for 3D Printing Applications", *Polymers*, vol. 15, p. 4129, 2023.
- [4] Justino Netto, J. M., Sarout, A. I., Santos, A. L. G., Lucas, A. A., Chinelatto, M. A., Alves, J. L., Gaspar-Cunha, A., Covas, J. A., Silveira, Z. C., "Design and validation of an innovative 3D printer containing a co-rotating twin screw extrusion unit", *Additive Manufacturing*, vol. 59, p. 103192, 2022.
- [5] Justino Netto, J. M., Idogava, H. T., Frezzatto Santos, L. E., de Castro Silveira, Z., Romio, P., Alves, J. L., "Screw-assisted 3D printing with granulated materials: a systematic review", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 115, pp. 2711–2727, 2021
- [6] Shaik, Y. P., Schuster, J., Shaik, A., "A Scientific Review on Various Pellet Extruders Used in 3D Printing FDM Processes", *Open Access Library Journal*, vol. 8, p. e7698, 2021.
- [7] Reddy, B. V., Reddy, N. V., Ghosh, A., "Fused deposition modeling using direct extrusion", *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 2, no. 1, pp. 51–60, 2007.
- [8] Patel, A., Taufik, M., "Extrusion-Based Technology in Additive Manufacturing: A Comprehensive Review", *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 49, pp. 1309–1342, 2024.
- [9] Hu, Z., He, J., Chen, W., Liu, W., Ding, J., He, C., Wang, S., Ning, F., Li, X., "High-performance carbon fiber reinforced polyether-ether-ketone composite pellets 3D-Printed via screw-extrusion additive manufacturing", *Composites Science and Technology*, vol. 246, p. 110362, 2024
- [10] Qian, B., "Design and simulation analysis of an extrusion structure based on screw extrusion 3D printing", *International Polymer Processing*, vol. 39, no. 4, pp. 497–511, 2024.