



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE MECATRÓNICA

**DISEÑO DE UN DADO DE EXTRUSIÓN CON CONTROL DE
TEMPERATURA PARA EL PROCESO DE CONFORMADO DE
MATERIALES POLIMÉRICOS RECICLADOS**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: JUAN DIEGO SOLANO CELLERI

TUTOR: ING. ANGEL EUGENIO CARDENAS CADME M.SC.

Cuenca – Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Juan Diego Solano Celleri con documento de identificación N° 0106760333 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 31 de Julio del 2025

Atentamente,



Juan Diego Solano Celleri
0106760333

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Juan Diego Solano Celleri con documento de identificación N° 0106760333, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor de la Propuesta Tecnológica: "Diseño de un dado de extrusión con control de temperatura para el proceso de conformado de materiales poliméricos reciclados", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 31 de Julio del 2025

Atentamente,



Juan Diego Solano Celleri

0106760333

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Angel Eugenio Cardenas Cadme con documento de identificación N° 0301631966, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UN DADO DE EXTRUSIÓN CON CONTROL DE TEMPERATURA PARA EL PROCESO DE CONFORMADO DE MATERIALES POLIMÉRICOS RECICLADOS, realizado por Juan Diego Solano Celleri con documento de identificación N° 0106760333, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Propuesta Tecnológica que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 31 de Julio del 2025

Atentamente,



Angel Eugenio Cardenas Cadme
0301631966

Dedicatoria

Estudiante 1

Dedico este trabajo a mi familia, por su respaldo incondicional y su presencia constante en cada etapa de este camino. Agradezco profundamente a los docentes que, con su orientación, compromiso y exigencia, forjaron en mí una base sólida tanto académica como personal, impulsándome a crecer con cada desafío.

De manera muy especial, dedico este logro a mi pareja, cuya compañía, paciencia y apoyo inquebrantable han sido un faro en los momentos difíciles y una fuente de motivación constante. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba, por alentarme a seguir adelante y por caminar a mi lado en este proceso. Este logro también es tuyo.

Agradecimientos

Estudiante 1

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, cuyo apoyo constante ha sido fundamental a lo largo de este proceso. Su confianza, comprensión y aliento me han dado la fuerza necesaria para superar los retos y continuar avanzando con determinación.

Agradezco también a mis profesores, por su valiosa guía académica y por compartir generosamente sus conocimientos. Su compromiso con la enseñanza ha sido clave en mi formación, y sus enseñanzas han dejado una huella profunda en mi manera de pensar y de enfrentar los desafíos.

Asimismo, extiendo mi gratitud a todas las personas que, de una u otra forma, contribuyeron con su tiempo, experiencia y disposición al desarrollo de este trabajo. Cada consejo, comentario y gesto de colaboración ha sido parte esencial de este logro.

Este documento fue realizado enteramente en L^AT_EX

Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación	I
Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana	II
Certificado de dirección del trabajo de titulación	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	XII
Abstract	XIII
1. Introducción	1
2. Problema	1
2.1. Descripción del problema	1
2.2. Antecedentes	2
2.3. Importancia y alcances	4
2.4. Delimitación	4
2.4.1. Espacial o geográfica	4
2.4.2. Temporal	5
2.4.3. Sectorial o institucional	5
3. Objetivos	6
3.1. Objetivo General	6
3.2. Objetivos Específicos	6
4. Marco Teórico	6
4.1. Extrusión	6
4.2. Variables del proceso	6
4.2.1. Relación de Extrusión	6
4.2.2. Fricción y Lubricación	7
4.2.3. Material de Entrada	7

4.3. Tipos de Extrusión	7
4.4. Material reciclado	8
4.4.1. Características	8
4.5. Dado extrusor	8
4.5.1. Tipos y funcionamiento	9
4.5.2. Componentes y partes	10
5. Marco metodológico	11
5.1. Establecer las especificaciones técnicas para el diseño de un dado extrusor con control de temperatura, considerando los requerimientos del proceso de extrusión	11
5.1.1. Caracterización Técnica y Aplicativa de la Extrusora COLLIN TEACH-LINE E 20 T en el Procesamiento de Polímeros Reciclados	11
5.1.2. Variables de Operación y Control del Proceso	12
5.1.3. Reología Aplicada a Polímeros Reciclados	13
5.1.4. Análisis Comparativo de Polímeros Reciclables	13
5.1.5. Compatibilidad del PEAD con la Extrusora COLLIN TEACH-LINE E20T	14
5.1.6. Normativas y estándares en la extrusión de polímeros reciclados	15
5.1.7. Fundamento del uso de perfiles sólidos extruidos en polímeros reciclados	15
5.1.8. Comparación geométrica de perfiles sólidos: H, C y Cuadrado	16
5.1.9. Consideraciones del diseño del dado para perfiles sólidos en PEAD reciclado	17
5.1.10. Compatibilidad entre el PEAD reciclado, el diseño de perfil y la extrusora COLLIN TEACH-LINE E 20 T	18
5.1.11. Propuesta de la sección transversal 40×40	18
5.1.12. Selección del perfil óptimo y medidas preliminares del dado	19
5.1.13. Selección de elementos calefactores	20
5.1.14. Sensorización térmica: Termocuplas tipo J	20
5.2. Diseñar un sistema de extrusión y de control de temperatura que permita el monitoreo del proceso	21
5.2.1. Diseño y desarrollo de la sección 40×40	21
5.2.2. Sistema de extrusión	22
5.2.3. Sistema de control de temperatura	24
5.3. Determinar los costos unitarios asociados a la fabricación e implementación de un dado extrusor con control de temperatura	26

5.3.1. Selección del material	27
5.3.2. Proceso de fabricación tercerizado	27
5.3.3. Costos adicionales	28
5.3.4. Margen por imprevistos	28
6. Resultados	29
6.1. Establecimiento de las especificaciones técnicas para el diseño de un dado extrusor con control de temperatura	29
6.2. Diseño de un sistema de extrusión y de control de temperatura que permita el monitoreo del proceso	31
6.3. Determinar los costos unitarios asociados a la fabricación e implementación de un dado extrusor con control de temperatura	36
6.3.1. Resumen de costos	37
7. Cronograma y actividades	38
8. Presupuesto	39
8.1. Talento humano	39
8.2. Recursos materiales	39
8.3. Costos totales del proyecto de titulación	40
9. Conclusiones	40
10. Recomendaciones	41
Referencias	45
ANEXOS	46

Lista de Tablas

1.	Comparación de perfiles	17
2.	Costo estimado del material (acero H13)	27
3.	Estimación del tiempo y costo por mecanizado tercerizado	28
4.	Parámetros FOPDT y PID estimados para zonas térmicas.	33
5.	Resumen de costos estimados del sistema propuesto	37
6.	Cronograma de actividades.	38
7.	Recurso de talento humano	39
8.	Recurso de talento humano	39
9.	Recursos del proyecto	40

Lista de Figuras

1.	Ubicación	5
2.	Esquema	9
3.	Densidad de fluido	22
4.	Diseño propuesto del dado extrusor	24
5.	Perfil cuadrado	30
6.	Abertura interna	31
7.	Modelo 3D del dado extrusor	32
8.	Comportamiento térmico en Zona 4 y Zona 5	33
9.	Distribución térmica del fluido fundido en el interior del dado extrusor . . .	34
10.	Distribución de temperatura en el cuerpo del dado extrusor	35
11.	Distribución de presión interna en el dado extrusor	36

Resumen

Este trabajo presenta el diseño de un dado de extrusión con control de temperatura para el procesamiento de polietileno de alta densidad (PEAD) reciclado en la extrusora Collin Teach-Line E20T. Partiendo de la problemática de variaciones reológicas y térmicas propias de los materiales reciclados, se establecieron las especificaciones técnicas del dado y del sistema de sensorización (termopares y control PID), así como los parámetros operativos de la extrusora (temperatura, presión, velocidad del tornillo). Mediante un análisis comparativo de perfiles sólidos (H, C y cuadrado), se seleccionó el perfil cuadrado de 40×40 mm como el más adecuado por su simplicidad de fabricación y distribución de tensiones. El diseño mecánico, modelado en CAD, fue dimensionado para acero H13, incluyendo una abertura interna de 26×26 mm, land de 18 mm y radios internos de 2 mm. Se estimaron los parámetros dinámicos de las zonas térmicas 4 y 5 (ganancia, tiempo característico y retardo) y se validó la configuración PID con respuesta de primer orden. Las simulaciones térmicas y de CFD confirmaron una distribución homogénea de temperatura (150–225 °C) y presiones internas manejables (hasta 600 kPa). Finalmente, se determinó un costo unitario estimado de fabricación e instrumentación de \$1 625,40 USD, garantizando viabilidad técnica y económica. Este diseño aporta una solución mecatrónica sólida para optimizar la calidad y uniformidad del material reciclado, favoreciendo su integración en procesos industriales posteriores.

Palabras clave: Dado de extrusión, extrusora Collin E20T, polímeros reciclados, control térmico, diseño mecatrónico.

Abstract

This thesis proposes the design of a temperature-controlled extrusion die for recycled high-density polyethylene (HDPE) using the Collin Teach-Line E20T laboratory extruder. Addressing the rheological and thermal variability of recycled polymers, technical specifications for the die and its sensor system (thermocouples and PID controllers) were defined, alongside key extruder parameters (temperature zones, pressure monitoring, screw speed). A comparative study of solid profiles (H, C, square) led to the selection of a 40 x 40 square profile for its manufacturing simplicity and stress distribution. The CAD-modeled die, machined from H13 tool steel, features a 26 x 26 internal opening, an 18 land length, and 2 internal radii.

Dynamic characterization of thermal zones (gain, time constant, dead time) validated a first-order-plus-dead-time model and PID tuning. Thermal and CFD simulations confirmed uniform temperature distribution (150 to 225) and manageable internal pressures (up to 600). The estimated unit cost for fabrication and instrumentation is \$1 625.40 USD, demonstrating both technical feasibility and economic viability. This mechatronic solution enhances recycled HDPE consistency, promoting its seamless integration into downstream industrial processes.

Keywords: Extrusion die, Collin E20T extruder, recycled polymers, thermal control, mechatronic design.

1. Introducción

La demanda de soluciones sostenibles ha impulsado el desarrollo de nuevas aplicaciones para los materiales poliméricos reciclados. En este contexto, los procesos de extrusión desempeñan un papel fundamental al permitir transformar estos materiales en formas útiles para su posterior reutilización. Sin embargo, para garantizar productos finales con características homogéneas y funcionales, es indispensable un control de los parámetros térmicos durante el proceso, particularmente en la zona del dado, donde se define la geometría y la calidad del material extruido.

Este proyecto se centra en el diseño de un dado de extrusión con control de temperatura, desarrollado específicamente para operar con la extrusora de laboratorio Collin Teach-Line E20T. El propósito es establecer una propuesta técnica que permita monitorear y regular de manera eficiente la temperatura en el dado, asegurando así la uniformidad del flujo polimérico y una adecuada estabilidad del proceso, especialmente al trabajar con materiales reciclados, los cuales presentan variaciones reológicas significativas respecto a los polímeros vírgenes.

La investigación se enfoca únicamente en el planteamiento del diseño, sin considerar su fabricación o puesta en marcha. A través de un enfoque mecatrónico, se integran aspectos mecánicos, térmicos, electrónicos y de control para obtener un sistema funcional que pueda ser implementado en procesos de extrusión a pequeña escala. Esta propuesta busca aportar una base técnica sólida para futuras aplicaciones orientadas al aprovechamiento eficiente de recursos plásticos reciclados.

2. Problema

2.1. Descripción del problema

Los procesos de recuperación y reciclaje de plástico, enfrenta una problemática técnica en la etapa de extrusión del material; pues, es necesario contar con un dado de extrusión adecuado que permita garantizar la homogeneidad y estandarización de las piezas obtenidas. De no ser de esta manera, afecta la calidad y uniformidad del material extruido, además de la eficiencia del proceso y genera inconsistencias que complican su integración en las etapas posteriores de producción en las cadenas industriales que utilizan este material reciclado.

El dado de extrusión es un componente esencial en el reciclaje de plástico, ya que define las características físicas del material extruido, como su forma y dimensiones. En el caso de las

empresas que se dedican a la elaboración de materia prima a partir de materiales reciclados, la falta de un dado diseñado específicamente para sus necesidades resulta en la obtención de productos con variaciones en sus propiedades, lo que puede dificultar su procesamiento en fases posteriores, como moldeado, inyección o fabricación de productos finales.

La problemática no se restringe únicamente a asegurar la calidad del proceso de extrusión, sino que abarca también la necesidad de un control térmico preciso y estable durante toda la operación. La ausencia de un sistema adecuado para regular la temperatura del dado de extrusión puede provocar variaciones en las propiedades del material reciclado, comprometiendo su homogeneidad y dificultando su integración en etapas posteriores de la cadena de producción. Por ello, es fundamental desarrollar un diseño de dado que garantice tanto la estabilidad térmica como la calidad del material extruido.

2.2. Antecedentes

El reciclaje de plásticos ha adquirido relevancia en la industria moderna debido a la necesidad de mitigar el impacto ambiental de los desechos plásticos. En este contexto, la extrusión se ha convertido en una técnica clave para transformar plásticos reciclados en nuevos productos, facilitando su reutilización en distintos sectores industriales (Ortiz-Hernandez, Troncoso-Palacio, Acosta-Toscano, Begambre-Meza, y Troncoso-Mendoza, 2019). De acuerdo con la información publicada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), en su resumen estadístico correspondiente al año 2021, se indica que un habitante de la zona urbana de Ecuador genera en promedio 0,9 kg de residuos sólidos diariamente. De este total, el 45% corresponde a residuos inorgánicos, siendo el plástico el componente que representa el 11,4%, porcentaje que se ha mantenido constante durante los años 2019, 2020 y 2021 (Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), 2021). De la misma manera, una publicación de UNICEF en 2022 señala que, en Ecuador, el 25% de las cinco millones de toneladas de residuos sólidos generados anualmente son potencialmente reciclables (UNICEF Ecuador, 2023).

La extrusión constituye una técnica ampliamente empleada en la transformación de materiales plásticos debido a su alta eficiencia y a la posibilidad de obtener geometrías definidas. En este contexto, el dado de extrusión cumple una función crítica, ya que determina aspectos clave del producto final, como su forma, dimensiones y uniformidad estructural. La falta de un dado diseñado para materiales reciclados puede provocar irregularidades en sus propiedades, dificultando su uso en procesos como inyección, termoformado o moldeo por compresión (Pérez, Torres, y Candal, 2013).

Diversas investigaciones han identificado el control térmico en el dado de extrusión como

un elemento determinante para asegurar la calidad del polímero procesado. Las variaciones de temperatura durante la operación pueden modificar la viscosidad del material fundido, generando inestabilidad en sus propiedades mecánicas y dimensiones. Por ello, se ha destacado la necesidad de una gestión térmica precisa en esta etapa, ya que favorece la uniformidad del producto extruido y minimiza defectos como irregularidades en el espesor, deformaciones o discontinuidades en la estructura.

Por ejemplo, el estudio de Migler, Lavalee, Dillon, Woods, y Gettinger (2001) mostró que la inducción de gradientes térmicos controlados puede eliminar las inestabilidades superficiales en la extrusión, como la "sharkskin", que son defectos comunes en la extrusión de polímeros fundidos. De manera similar, Miller y Rothstein (2004) demostraron que el control de gradientes térmicos en el proceso de extrusión contribuye a minimizar las inestabilidades en los polímeros fundidos, lo cual es crucial para evitar defectos en la superficie del extrudado y mejorar su calidad.

Aali y cols. (2018) también corroboraron estos hallazgos en su investigación sobre la extrusión de materiales plásticos, señalando que un control térmico preciso es esencial para asegurar una distribución uniforme del flujo del polímero y evitar deformaciones o defectos dimensionales en el producto final.

Estos estudios proporcionan evidencia de que la regulación adecuada de la temperatura en el dado de extrusión no solo mejora la uniformidad del material extruido, sino que también minimiza defectos como variaciones de espesor y deformaciones, asegurando así la calidad y estabilidad del producto final (Pérez y cols., 2013).

Pérez y cols. (2013) analizaron el impacto de las variables del proceso de extrusión en la relación estructura-propiedades de películas tubulares de polietileno de baja densidad (PEBD). Sus hallazgos indican que factores como la temperatura y la velocidad de enfriamiento afectan la morfología y las propiedades mecánicas del material extruido, lo que resalta la importancia del control térmico para garantizar un producto final de calidad.

Por su parte, Ortiz-Hernandez y cols. (2019) evaluaron el uso de herramientas de calidad para optimizar la extrusión de plásticos. Su investigación subrayó la relevancia de controlar parámetros críticos como temperatura y presión, demostrando que una gestión eficiente de estas variables mejora el rendimiento del proceso y minimiza defectos en el producto. Asimismo, la implementación de metodologías de control de calidad contribuye a la estandarización del material extruido, facilitando su integración en otros procesos industriales.

2.3. Importancia y alcances

Este proyecto está orientado a empresas especializadas en la recuperación y reciclaje de materiales plásticos. Su finalidad principal es el diseño de un dado de extrusión con control térmico integrado, con el propósito de optimizar la calidad y la uniformidad del polímero reciclado obtenido.

La falta de un dado de extrusión diseñado adecuadamente provoca irregularidades en el material plástico procesado, dificultando su compatibilidad con las etapas subsiguientes de la cadena productiva. Esta deficiencia compromete la posibilidad de obtener un producto con propiedades uniformes que satisfaga los requisitos exigidos en procesos posteriores.

Diseñar e implementar un dado de extrusión con control térmico integrado permitirá supervisar en tiempo real el proceso de extrusión, favoreciendo la obtención de un material con mayor homogeneidad. Esto contribuirá a mejorar tanto la calidad del producto como su adecuación a las etapas posteriores del procesamiento de polímeros reciclados. La solución propuesta responde directamente a una necesidad técnica del proceso de extrusión, reduciendo el desperdicio de material.

Este trabajo de titulación se centrará en el diseño técnico de un dado extrusor sensorizado, considerando:

- La especificación de los parámetros técnicos necesarios para garantizar su funcionamiento.
- La integración de un sistema de sensorización que permita el monitoreo de condiciones operativas como la temperatura.
- La determinación de los costos unitarios asociados a su fabricación.

El proyecto no abarcará el análisis detallado del producto final extruido ni de los procesos posteriores a la extrusión. El alcance se limita a desarrollar una solución técnica que permita mejorar la consistencia y calidad del material extruido, facilitando su aprovechamiento en las etapas internas de la producción.

2.4. Delimitación

El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

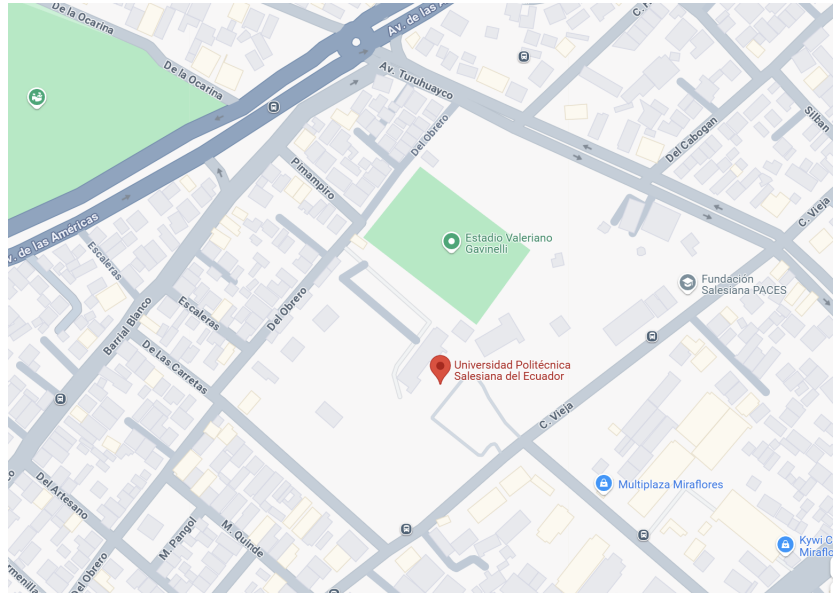
2.4.1. Espacial o geográfica

La delimitación espacial del presente trabajo de titulación corresponde a la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca, ubicada en Av. Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja, Cuenca,

Ecuador, donde se analizará la información necesaria para el desarrollo del proyecto, como se muestra en la figura 1.

Figura 1

Ubicación.



Nota: Se puede observar la ubicación exacta de la Universidad Politécnica Salesiana.

2.4.2. Temporal

Se establece que el trabajo se desarrollará desde el 17 de marzo de 2025 y tendrá una duración de 240 horas, considerando el tiempo necesario para la aprobación, ejecución y finalización de la asignatura Integración Curricular.

2.4.3. Sectorial o institucional

El proyecto se enmarca en el sector industrial orientado al reciclaje de plásticos, específicamente en la etapa de extrusión de material reciclado. En este contexto, se llevará a cabo el diseño y la evaluación de un dado de extrusión equipado con sensores para el monitoreo del proceso.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

- Diseñar un dado de extrusión con control de temperatura para el proceso de conformado de materiales poliméricos reciclados.

3.2. Objetivos Específicos

- Establecer las especificaciones técnicas para el diseño de un dado extrusor con control de temperatura, considerando los requerimientos del proceso de extrusión.
- Diseñar un sistema de extrusión y de control de temperatura que permita el monitoreo del proceso.
- Determinar los costos unitarios asociados a la fabricación e implementación de un dado extrusor con control de temperatura.

4. Marco Teórico

4.1. Extrusión

La extrusión es un proceso de conformación en el que se forman fibras infinitamente largas o estructuradas anisótropas semicontinuas, a partir de un bloque o una dispersión compactada (Lillford, 2008). Este proceso consiste en fundir una resina a causa de la temperatura y fricción la cual es forzada a pasar por un dado el cual proporciona una forma predefinida para luego ser enfriada con el objetivo de evitar deformaciones permanentes (Campos y Caraguay, 2021).

En la extrusión de plásticos, los termoplásticos se ablandan por calentamiento antes de la extrusión y, para que la forma se mantenga, los termoplásticos deben enfriarse rápidamente y, normalmente, apoyarse mientras se enfrían (Levy, 1989).

4.2. Variables del proceso

4.2.1. Relación de Extrusión

La relación de extrusión (r_x) se define como la razón entre el área inicial del material (A_o) y el área final después del proceso (A_f):

$$r_x = \frac{A_o}{A_f} \quad (1)$$

Esta relación indica el grado de reducción del área del material y determina la presión necesaria para el proceso.

4.2.2. Fricción y Lubricación

La fricción entre el material y las paredes del dado influye en la fuerza de extrusión. Para reducirla, se emplean lubricantes. La fricción (F_f) se modela con la ecuación de Coulomb:

$$F_f = \mu N \quad (2)$$

donde:

- μ = Coeficiente de fricción.
- N = Fuerza normal entre el material y el dado.

4.2.3. Material de Entrada

El material inicial afecta la eficiencia del proceso. Su longitud, dureza y propiedades térmicas influyen en la fuerza necesaria y la calidad del producto final. La resistencia del material durante la extrusión puede aproximarse con la ecuación:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (3)$$

donde:

- σ = Esfuerzo real.
- K = Coeficiente de resistencia del material.
- ε = Deformación real.
- n = Exponente de endurecimiento por deformación.

4.3. Tipos de Extrusión

Existen dos tipos principales de extrusión:

- **Extrusión directa:** El material y el pistón se mueven en la misma dirección.
- **Extrusión indirecta:** El dado se mueve hacia el material, reduciendo la fricción y la presión requerida.

En términos de eficiencia, la fuerza de extrusión en la extrusión directa (F_d) y en la extrusión indirecta (F_i) se comparan como:

$$F_d > F_i \quad (4)$$

ya que en la extrusión indirecta no hay contacto entre el material y el contenedor, lo que disminuye la fricción (Dieter, 2000; Groover, 2019; Kalpakjian y Schmid, 2013).

4.4. Material reciclado

Los plásticos contenidos en los residuos sólidos urbanos (RSU) son mayoritariamente polietileno (PE) y polipropileno (PP) (alrededor del 6%) y en menor proporción están el poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC), polietilentereftalato (PET), poliestireno-butadieno (PS-BD), poli(metacrilato de metilo) (PMMA) (Arandes, Bilbao, y López, 2004).

4.4.1. Características

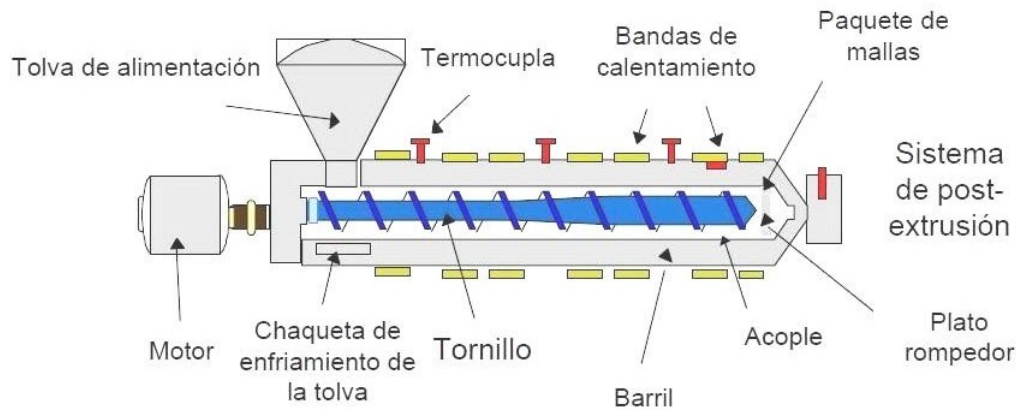
Los plásticos se caracterizan por una relación resistencia densidad alta, unas propiedades excelentes para el aislamiento térmico y eléctrico y una buena resistencia a los ácidos, álcalis y disolventes. Las enormes moléculas de las que están compuestos pueden ser lineales, ramificadas o entrecruzadas, dependiendo del tipo de plástico. Las moléculas lineales y ramificadas son termoplásticas, mientras que las entrecruzadas son termoendurecibles (Restrepo, Cagüño, y Santamaría, 2007).

4.5. Dado extrusor

El dado de extrusión es el elemento fundamental que define la geometría y las propiedades finales del perfil extrudido. Instalado al final del cilindro calefaccionado, su diseño debe garantizar un flujo uniforme del polímero fundido, controlar las variaciones de presión y minimizar las tensiones internas que puedan generar defectos superficiales o dimensionales. Además, al incorporar sistemas de control térmico y sensorización, el dado permite mantener condiciones de proceso estables, cruciales al trabajar con materiales reciclados que presentan variaciones reológicas significativas.

Figura 2

Esquema de extrusión general.



Nota: Se puede observar el esquema de una extrusión general (Ingeniería Química en el Perú, 2012).

La Figura 2 ilustra el proceso general de extrusión, destacando el dado como una de las partes más críticas de la extrusora. En este componente se realiza la conformación final del polímero fundido, ya que el material es forzado a atravesar una abertura con una geometría específica que determina las dimensiones y la forma del producto extruido. El resto de la extrusora tiene básicamente una única tarea: suministrar el polímero fundido al dado con la presión y consistencia requeridas (Rauwendaal, 2014). Aunque su operación es sencilla, el dado, que es el elemento formador del producto, es el que define la calidad mecánica y la apariencia de los productos terminados (Martínez López, Barba Pingarrón, y Trujillo Barragán, 2009).

4.5.1. Tipos y funcionamiento

- Paso directo: Normalmente se usan para la extrusión de tubo, barra, perfiles, lámina y película plana y tubular (Martínez López y cols., 2009).
- Cabeza cruzada: Tienen sus ejes en un ángulo de 90° con relación al suministro de material, se usan generalmente para la producción de cables y alambres aislados o en otros procesos en donde es necesario introducción de filamento continuo u otro miembro para ser cubierto por plástico al pasar por el mandril del dado (Martínez López y cols., 2009).

- Cabeza descentrada: Se desarrollaron a partir de las cabezas cruzadas. En este arreglo el material cambia de dirección dos veces, con la intención de compensar, en lo posible, la falta de balance que resulta de un solo cambio de dirección como ocurre en la cabeza cruzada normal (Martínez López y cols., 2009).

4.5.2. Componentes y partes

- Entrada (Feeder Zone): Es la parte donde el material plástico fundido entra al extrusor. Está diseñado para asegurar que el material se introduzca de manera uniforme y sin obstrucciones (Pospisil, 2005).
- Cuerpo del Dado: Según (Ortiz-Hernandez y cols., 2019) La estructura principal que alberga todos los componentes. Está diseñado para resistir la alta presión y temperatura del proceso de extrusión (Brydson, 1999).
- Boquilla (Die Lip): La parte por donde el material extruido sale del dado. Su diseño y forma determinan las características del producto final, como el grosor o el perfil (Crawford, 1998).
- Cámara de Extrusión: Es donde el material fundido es forzado a través del dado. Puede ser una zona de compresión, donde el material es comprimido para aumentar la presión antes de pasar por la boquilla (Pospisil, 2005).
- Die Inserts (Insertos de Dado): Son piezas reemplazables que se colocan dentro del dado para modificar el perfil de extrusión o mejorar la eficiencia de la extrusión. Los insertos pueden variar según el tipo de material y el producto deseado (Crawford, 1998).
- Sistema de Enfriamiento (Cooling System): Este sistema es necesario para enfriar el material extruido de manera controlada, evitando deformaciones y asegurando que el producto mantenga su forma (Brydson, 1999).
- Zona de Ajuste de Flujo: En algunos casos, se incorpora un sistema para ajustar la presión o el flujo del material extruido, lo que ayuda a optimizar la uniformidad del extruido (Pospisil, 2005).
- Partes de Sellado: Estas son las áreas que aseguran que el material plástico no se escape durante el proceso de extrusión (Brydson, 1999).

5. Marco metodológico

Este apartado describe el enfoque metodológico adoptado para el diseño e implementación de un dado extrusor con control de temperatura, enfocado en el procesamiento de polímeros reciclados. La metodología incluye la caracterización técnica de la extrusora utilizada, la evaluación de variables operativas y reológicas, el diseño del sistema de extrusión y control, y el análisis de costos asociados, garantizando así la viabilidad técnica del sistema propuesto.

5.1. Establecer las especificaciones técnicas para el diseño de un dado extrusor con control de temperatura, considerando los requerimientos del proceso de extrusión

Se identificaron las condiciones técnicas requeridas para el diseño del dado extrusor, considerando el comportamiento del PEAD reciclado y los parámetros del proceso de extrusión. Se caracterizó la extrusora COLLIN TEACH-LINE E 20 T, analizando sus capacidades térmicas y mecánicas, así como las variables de operación. Además, se evaluaron propiedades reológicas y la compatibilidad del material con el equipo.

5.1.1. Caracterización Técnica y Aplicativa de la Extrusora COLLIN TEACH-LINE E 20 T en el Procesamiento de Polímeros Reciclados

La extrusora COLLIN TEACH-LINE E 20 T es un equipo diseñado para aplicaciones de investigación, desarrollo y producción en lotes pequeños. Cuenta con un tornillo simple de 20 mm de diámetro y una relación longitud-diámetro (L/D) de 25:1. El tornillo está fabricado en acero nitrurado y posee un tratamiento superficial para mejorar su resistencia al desgaste (COLLIN Lab & Pilot Solutions, 2023a; *Información Técnica y Especificaciones de COLLIN TEACH-LINE E 20 T*, 2023; *Resumen Técnico de la Extrusora COLLIN TEACH-LINE E 20 T*, 2023).

El cilindro de la extrusora está dividido en tres zonas calefaccionadas mediante resistencias eléctricas independientes, cada una controlada por un sistema PID. Es posible agregar hasta tres zonas adicionales de calefacción, dependiendo del dado instalado. La capacidad máxima de procesamiento es de hasta 5 kg/h, variable según el tipo de polímero procesado (*Información Técnica y Especificaciones de COLLIN TEACH-LINE E 20 T*, 2023).

El motor está equipado con un variador de frecuencia que permite ajustar la velocidad del tornillo en un rango de 10 a 150 rpm. El sistema de control se basa en un PLC Siemens S7, que se maneja mediante una interfaz HMI.

El equipo incorpora sensores de temperatura PT100 y sensores de presión para el monitoreo del flujo de masa fundida (*Resumen Técnico de la Extrusora COLLIN TEACH-LINE E 20 T*, 2023). Sus dimensiones son aproximadamente 1200 mm de largo, 600 mm de ancho y 1400 mm de alto, con un peso cercano a los 200 kg (*Información Técnica y Especificaciones de COLLIN TEACH-LINE E 20 T*, 2023). Es compatible con diferentes cabezales, incluyendo los para filamento, lámina o tubo (COLLIN Lab & Pilot Solutions, 2023a), lo que facilita su uso en el estudio de polímeros reciclados bajo distintas condiciones operativas.

5.1.2. Variables de Operación y Control del Proceso

El funcionamiento de la extrusora COLLIN TEACH-LINE E 20 T se basa en la gestión precisa de ciertas variables de operación que impactan directamente en la calidad del producto final. Esto es especialmente relevante cuando se trabaja con polímeros reciclados, cuyo comportamiento puede variar notablemente. El equipo permite controlar directamente la temperatura y la presión de extrusión, mientras que otras variables como la velocidad del tornillo, el torque del motor y el consumo energético responden indirectamente a esos ajustes (COLLIN Lab & Pilot Solutions, 2023b; *Página Oficial COLLIN TEACH-LINE E 20 T*, 2023).

Las variables clave del proceso son:

- **Temperatura:** Se controla en varias zonas del barril, con rangos entre 150 °C y 280 °C, dependiendo del tipo de polímero, como PEAD o PP. La regulación precisa permite una fusión homogénea (*Página Oficial COLLIN TEACH-LINE E 20 T*, 2023).
- **Presión de extrusión:** Monitorizada mediante sensores ubicados cerca de la boquilla, permite mantener un flujo constante y detectar variaciones en la viscosidad (COLLIN Lab & Pilot Solutions, 2023b).
- **Velocidad del tornillo:** Aunque no se ajusta directamente desde el panel de control, está influenciada por las condiciones de temperatura y presión. Afecta tanto el caudal como la cizalla aplicada al material.
- **Torque del motor:** Refleja la resistencia del polímero a moverse a través del tornillo y puede variar según su viscosidad y carga.
- **Consumo de energía:** Es un buen indicador de eficiencia, útil especialmente para monitorear la extrusión de materiales reciclados.

El monitoreo continuo de estas variables permite realizar ajustes en tiempo real para optimizar la calidad del fundido, la mezcla del material y la formación del producto extruido.

5.1.3. Reología Aplicada a Polímeros Reciclados

La reología de los polímeros reciclados es clave para entender su comportamiento durante el procesamiento. El reciclaje altera la estructura molecular del polímero, lo que puede afectar propiedades como la viscosidad, el índice de fluidez (MFI), el comportamiento viscoelástico y la sensibilidad a la cizalla (A. P. GmbH, 2021; Netzsch, 2022).

- **Viscosidad:** Suele reducirse debido a la degradación térmica y mecánica, lo que afecta la resistencia del material al flujo y puede influir en la calidad final del producto (A. P. GmbH, 2021).
- **Índice de fluidez (MFI):** Tiende a aumentar, indicando una mayor facilidad de flujo. Sin embargo, este cambio puede señalar una pérdida de propiedades mecánicas. Además, el MFI representa el comportamiento a una sola velocidad de cizallamiento, por lo que no siempre es un buen predictor del desempeño en condiciones reales (Netzsch, 2022).
- **Comportamiento viscoelástico:** La degradación altera la proporción entre los componentes viscoso y elástico, afectando la capacidad del material para almacenar y disipar energía durante el esfuerzo (A. P. GmbH, 2021).
- **Sensibilidad a la cizalla:** Polímeros degradados pueden presentar adelgazamiento por cizallamiento (shear-thinning), donde la viscosidad disminuye al aumentar la velocidad de deformación. Esto puede facilitar el procesamiento, pero también aumenta el riesgo de una degradación térmica adicional (RMIX Technical Reports, 2023).

La COLLIN TEACH-LINE E20T permite modular estas condiciones de operación, facilitando la evaluación de diferentes grados de reciclaje o mezclas con material virgen, lo cual es esencial para optimizar las propiedades reológicas y mantener la calidad del producto final (COLLIN Lab & Pilot Solutions, 2023a).

5.1.4. Análisis Comparativo de Polímeros Reciclables

Entre los polímeros reciclables más comunes, se destacan las siguientes propiedades:

- **PEAD (Polietileno de Alta Densidad):** Tiene buena resistencia al calor, a los golpes y a la humedad. Es fácil de reciclar y su índice de fluidez (MFI) se mantiene relativamente estable en procesos suaves de extrusión (Ragaert, Delva, y Van Geem, 2017).

- **PP (Polipropileno):** Presenta buenas propiedades mecánicas y térmicas. Sin embargo, es sensible a la degradación por calor y necesita aditivos para evitar que se oxide durante el reciclaje (Al-Salem, Lettieri, y Baeyens, 2009).
- **PET (Polietilentereftalato):** Antes de procesarlo, debe secarse bien porque la humedad puede afectar su estructura y debilitar el material. Es muy usado en botellas y envases (Awaja y Pavel, 2005).
- **PVC (Policloruro de Vinilo):** Puede liberar gases dañinos como HCl cuando se calienta, por lo que requiere un control estricto en su procesamiento. Esto complica su reciclaje (Wiles y Scott, 2006).
- **PS (Poliestireno):** Es frágil con el calor y tiene bajo valor económico al reciclarse, lo que limita su reutilización (Hopewell, Dvorak, y Kosior, 2009).

Por sus propiedades térmicas estables, facilidad de procesamiento y buen desempeño después del reciclado, el PEAD es una opción destacada para ser trabajado en la extrusora COLLIN TEACH-LINE E20T.

5.1.5. Compatibilidad del PEAD con la Extrusora COLLIN TEACH-LINE E20T

El polietileno de alta densidad (PEAD) es uno de los materiales más compatibles con la extrusora COLLIN TEACH-LINE E20T, ya que presenta múltiples ventajas para su procesamiento:

- **Compatibilidad térmica:** Su rango de fusión, entre 160 °C y 220 °C, está dentro de la capacidad de regulación de la extrusora.
- **Estabilidad reológica:** Conserva propiedades mecánicas aceptables incluso tras varios ciclos de reciclaje.
- **Baja degradación:** Puede reprocesarse sin aditivos estabilizantes, simplificando el tratamiento del material reciclado.
- **Buena fluidez:** El material triturado fluye correctamente por la tolva, sin necesidad de equipos auxiliares.
- **Propiedades post-extrusión:** Los productos conservan rigidez estructural, resistencia química y propiedades de barrera adecuadas para aplicaciones no críticas.

Por todo ello, el PEAD reciclado representa una opción ideal para ensayos de laboratorio y validación de parámetros en procesos de extrusión, facilitando un control estable del proceso y una alta repetibilidad de los resultados.

5.1.6. Normativas y estándares en la extrusión de polímeros reciclados

La calidad y repetibilidad en la extrusión de perfiles sólidos de PEAD reciclado requieren seguir ciertas normativas internacionales que establecen criterios técnicos específicos para garantizar un producto final óptimo. Por ejemplo, la norma ASTM D3364-15 señala que se debe controlar estrictamente la temperatura del fundido para evitar la degradación térmica, manteniendo rangos recomendados según el tipo de polímero, generalmente entre 180 °C y 220 °C para el PEAD. Además, especifica que la presión en el dado debe ser uniforme para evitar fluctuaciones que causen variaciones en la sección transversal y defectos superficiales (*Standard Specification for Polyethylene Plastics Extrusion Materials for Wire and Cable*, 2015). En cuanto a la velocidad de extrusión, las normas recomiendan mantener un régimen estable para evitar tensiones internas o deformaciones post-extrusión, especialmente en materiales reciclados donde la viscosidad puede ser variable debido a la degradación (*Plastics – Extrusion of pipes, profiles and sheets – Part 1: General principles*, 2013). La ISO 11403-1:2013 enfatiza la importancia del diseño hidrodinámico del dado, recomendando transiciones suaves y simetría en el canal de flujo para asegurar una distribución homogénea del material fundido, minimizando zonas de recirculación o estancamiento que puedan generar defectos internos o superficiales (*Plastics – Extrusion of pipes, profiles and sheets – Part 1: General principles*, 2013). Estas consideraciones normativas, junto con el control riguroso de parámetros térmicos, presión y velocidad, permiten optimizar la extrusión de perfiles en PEAD reciclado y asegurar que el producto cumpla con requisitos estructurales y dimensionales necesarios para su aplicación final (Liu, Zhang, y Chen, 2020; Ramírez y Martínez, 2018).

5.1.7. Fundamento del uso de perfiles sólidos extruidos en polímeros reciclados

La extrusión es un proceso ampliamente utilizado en la transformación de polímeros termoplásticos, como el polietileno de alta densidad (PEAD), especialmente cuando se trabaja con material reciclado. Este proceso permite la fabricación de perfiles sólidos con geometrías variadas y propiedades adaptadas a diferentes aplicaciones estructurales. En el caso del PEAD reciclado, es importante considerar que su comportamiento puede verse afectado por la degradación termo-mecánica acumulada durante los ciclos de extrusión. Estudios han demostrado que el índice de fluidez (MFI) del PEAD aumenta con cada ciclo de reciclaje, lo

que indica una disminución de la viscosidad y una pérdida gradual de resistencia mecánica, tanto a la tensión como al impacto (Pfaendner, 2015). Esta degradación obliga a optimizar el diseño del perfil y de la boquilla del extrusor para garantizar un procesamiento eficiente y minimizar defectos estructurales en el producto final.

5.1.8. Comparación geométrica de perfiles sólidos: H, C y Cuadrado

En la producción de perfiles estructurales con PEAD reciclado, tres de las geometrías más utilizadas son los perfiles sólidos tipo H, tipo C (canal) y de sección cuadrada. A continuación, se analiza su desempeño estructural, facilidad de extrusión y compatibilidad con procesos a pequeña escala.

Perfil tipo H

El perfil tipo H consiste en dos alas laterales unidas por un alma central, lo cual proporciona una excelente distribución del material lejos del eje neutro. Esto permite maximizar el momento de inercia, siendo ideal para resistir cargas de flexión vertical. No obstante, su fabricación implica complejidades adicionales en el diseño del dado, ya que requiere bifurcaciones internas en el flujo para alimentar cada ala y garantizar simetría geométrica al momento de la salida (Bogale, 2010).

Perfil tipo C (canal)

El perfil C presenta una sección en forma de U , con un alma vertical y dos alas horizontales. Este tipo de perfil permite una buena resistencia axial y algo de rigidez estructural en dirección perpendicular al alma. Su diseño de dado es menos complejo que el del H, ya que el flujo se distribuye a través de una geometría abierta, pero al tener una sola cara abierta, presenta menor rigidez torsional y puede sufrir deformaciones si no se controla adecuadamente la salida y el enfriamiento (Bogale, 2010).

Perfil cuadrado sólido

Este tipo de perfil tiene una sección simétrica, por lo que presenta una distribución de rigidez uniforme en ambas direcciones principales (horizontal y vertical). A diferencia del perfil H, su momento de inercia no es tan elevado en una dirección específica, pero posee buena estabilidad a cargas multidireccionales y torsión. Su diseño de boquilla es el más sencillo entre los tres, y su fabricación resulta más viable en extrusoras de laboratorio (Bogale, 2010).

Tabla comparativa de perfiles sólidos (dimensiones referenciales)

Tabla 1

Comparación de perfiles

Perfil	Rigidez Flexional	Resistencia Torsional	Complejidad del Dado	Aplicación sugerida
H	Alta (eje fuerte)	Media	Alta	Soportes horizontales
C	Media	Baja	Media	Encastres o guías
Cuadrado	Media	Alta	Baja	Columnas, adoquines

5.1.9. Consideraciones del diseño del dado para perfiles sólidos en PEAD reciclado

El diseño de la boquilla de extrusión o dado es un factor determinante en la calidad y estabilidad dimensional del perfil extruido. En perfiles sólidos, los principales aspectos que deben considerarse son:

- **Distribución uniforme del flujo fundido:** El flujo de PEAD reciclado tiende a presentar una viscosidad reducida tras múltiples ciclos de reprocesamiento, por lo que es crítico evitar bifurcaciones bruscas o zonas de estancamiento en el canal del dado. El diseño debe favorecer transiciones suaves entre zonas del flujo y mantener simetría hidráulica, especialmente en perfiles tipo H (Bogale, 2010).
- **Longitud de tierra o land length:** Esta sección recta y uniforme al final del canal asegura que la presión de extrusión se estabilice antes de la salida. En perfiles sólidos de espesor 5 a 6 mm, se recomienda una longitud de al menos 20 mm para asegurar geometría constante y minimizar pandeos (Bogale, 2010).
- **Radios de transición y esquinas:** El uso de esquinas internas con radios mayores a 1 mm permite evitar concentraciones de tensión y facilita la salida del perfil sin desgarros o distorsiones, particularmente en perfiles con cavidades internas o zonas delgadas (Bogale, 2010).
- **Manejo térmico en el dado:** La extrusora COLLIN permite agregar zonas calefaccionadas adicionales al dado. Se recomienda mantener una temperatura controlada entre 180 °C y 210 °C en la salida, para evitar la cristalización prematura del PEAD reciclado, cuyo MFI se incrementa conforme pierde integridad molecular (Pfaendner, 2015).

5.1.10. Compatibilidad entre el PEAD reciclado, el diseño de perfil y la extrusora COLLIN TEACH-LINE E 20 T

La extrusora COLLIN TEACH-LINE E 20 T es un equipo de laboratorio con capacidad de procesamiento ajustada a aproximadamente 2 kg/h en condiciones óptimas. Esto impone una limitación directa sobre el área máxima de la sección transversal del perfil, la cual puede estimarse a partir del balance entre velocidad de arrastre y densidad del material. Asumiendo una velocidad promedio de arrastre de 50 mm/min y una densidad de 0,95 g/cm³ para el PEAD reciclado, se obtiene un área máxima de sección que oscila entre 500 mm² y 700 mm². Esto se corresponde con perfiles rectangulares o sólidos de dimensiones moderadas (C. L. . P. S. GmbH, 2020).

Aunque los perfiles tipo H y C pueden mantenerse dentro del rango permisible si se ajustan los espesores, el perfil cuadrado se mantiene como una alternativa viable en términos de rigidez estructural, reparto de tensiones y eficiencia de sección respecto al peso extruido. Además, su capacidad para resistir cargas multidireccionales lo convierte en un candidato ideal para aplicaciones como bases modulares, refuerzos o estructuras peatonales (Bogale, 2010).

5.1.11. Propuesta de la sección transversal 40×40

Para optimizar el llenado uniforme, minimizar las pérdidas de carga y asegurar la viabilidad mecánica del dado, proponemos una salida cuadrada de 40 × 40 mm basada en los siguientes criterios:

- **Conservación de la masa y continuidad de flujo.** En régimen estable e incompresible, la ecuación de continuidad indica

$$Q = Av = \text{constante},$$

donde A es el área de la sección transversal y v la velocidad media del polímero. La visualización de las trayectorias en la imagen muestra que, tras el estrechamiento, la densidad de partículas permanece homogénea hasta la salida. Por tanto, un área de $A_{\text{salida}} = 40 \times 40 = 1600 \text{ mm}^2$ garantiza que el caudal entrante se evacúe sin generar zonas muertas, recirculaciones o sobrepresiones locales.

- **Distribución uniforme de velocidad.** Un perfil cuadrado reduce gradientes de velocidad respecto a una salida circular o rectangular muy alargada. La sección de 40 × 40 mm homogeneiza el perfil de velocidad sobre toda la cara de salida, evitando picos que

incrementen la erosión interna del dado o provoquen variaciones en la calidad superficial del perfil extruido.

- **Factibilidad de mecanizado y rigidez estructural.** El tamaño de 40×40 mm se ajusta a tolerancias estándar de torneado y fresado en acero H13:
 - Permite un espesor mínimo de pared de 5mm sin comprometer la resistencia mecánica.
 - Facilita la sujeción mediante tornillería M10×40mm (norma ISO 4762) garantizando rigidez ante las presiones internas.
 - Concuerda con el rango de capacidad de la máquina COLLIN Teach-Line E 20 T, adaptándose sin necesidad de utillajes especiales.

5.1.12. Selección del perfil óptimo y medidas preliminares del dado

Tomando en cuenta:

- La degradación progresiva del PEAD reciclado (aumento del MFI, pérdida de módulo elástico e impacto) (Pfaendner, 2015).
- La necesidad de garantizar estabilidad estructural en aplicaciones semipesadas (como adoquines, guías, soportes). La capacidad técnica de la extrusora (2 kg/h, Ø 20 mm, L/D 25:1) (C. L. . P. S. GmbH, 2020).
- La simplicidad en el diseño del dado y facilidad de calibración (Bogale, 2010).

Se propone como perfil óptimo el perfil sólido tipo cuadrado, con las siguientes medidas preliminares para el diseño del dado:

- Altura total del perfil: 40 mm
- Ancho total del perfil: 40 mm
- Espesor de pared: 5 mm
- Land del dado (zona uniforme antes de salida): 18 mm
- Radios internos: 2 mm

Este diseño mantiene el equilibrio entre masa procesada, rigidez estructural y eficiencia de forma, permitiendo a la extrusora COLLIN operar de forma estable y reproducible sin requerir mecanismos de expansión o calibradores adicionales complejos.

5.1.13. Selección de elementos calefactores

Como parte de la integración del sistema de control térmico en el diseño del dado extrusor, se consideraron dos opciones viables de elementos calefactores tipo banda: bandas de mica y bandas cerámicas. Ambas alternativas fueron evaluadas en función de su potencia, dimensiones, compatibilidad geométrica con el dado y disponibilidad comercial.

La primera opción corresponde a un calentador tipo banda de mica, marca Tutco HT Mica o Backer Marathon, con potencia nominal de 1000W a 230V. Esta banda presenta un diseño plano con dimensiones aproximadas de 80mm de ancho por 340mm de largo, y cuenta con la posibilidad de integrar un sensor tipo termopar de forma externa. La banda de mica ofrece una excelente respuesta térmica, buena distribución del calor y una instalación sencilla sobre superficies metálicas planas, lo que la hace adecuada para el diseño rectangular del dado extrusor propuesto.

Como segunda opción, se evaluó una banda calefactora cerámica con carcasa de acero inoxidable, marca Yuheng o Kayson, disponible en plataformas como Amazon, con una potencia de 400W a 230V. Su geometría cilíndrica ($\varnothing$ 75mm $\times$ 35mm de largo) la hace más adecuada para aplicaciones tubulares o zonas curvas, aunque su resistencia mecánica y eficiencia térmica son superiores a las de las bandas de mica. También permite la instalación de sensores de temperatura externos.

Ambas opciones cumplen con las especificaciones del sistema térmico diseñado y permiten un adecuado monitoreo de la temperatura mediante sensores tipo termopar independientes. Sin embargo, se priorizó el uso de bandas de mica debido a su mayor superficie de contacto plano, mayor disponibilidad local y facilidad de adaptación al volumen rectangular del cuerpo del dado.

5.1.14. Sensorización térmica: Termocuplas tipo J

Para el monitoreo y control de la temperatura en el diseño del dado extrusor, se optó por el uso de termocuplas tipo J, las cuales son compatibles con el sistema de control térmico de la extrusora COLLIN Teach-Line E 20 T. Esta extrusora de laboratorio incluye de fábrica sensores de temperatura tipo J conectados a sus controladores PID, lo que facilita la integración de estos sensores al nuevo sistema diseñado.

Las termocuplas tipo J están compuestas por dos metales diferentes: hierro (Fe) y constantán (una aleación de cobre y níquel), generando una señal de voltaje proporcional a la diferencia de temperatura entre el punto de medición (unión caliente) y el punto de referencia (unión fría). Son ampliamente utilizadas en aplicaciones industriales debido a su buena sensibilidad

(aproximadamente $55\mu\text{V}/^\circ\text{C}$), su bajo costo y su rango de operación adecuado, que va desde -40°C hasta aproximadamente 750°C . Estas características las hacen especialmente adecuadas para el monitoreo térmico durante la extrusión de polímeros como el PEAD reciclado, cuyo rango de procesamiento térmico se encuentra entre 160°C y 220°C .

Además, la robustez mecánica y la rapidez de respuesta térmica de las termocuplas tipo J permiten obtener lecturas precisas y confiables durante las variaciones dinámicas de temperatura que pueden presentarse por los picos de presión o por los ajustes en el flujo de masa fundida. En este proyecto, las termocuplas se instalarán en puntos estratégicos del dado extrusor, preferiblemente cercanos a la salida y a las zonas de mayor concentración térmica, con el fin de garantizar un control efectivo y localizado de la temperatura del perfil extruido.

El aprovechamiento de los sensores de temperatura ya incorporados en la extrusora no solo mejora la compatibilidad del sistema, sino que también optimiza los recursos disponibles y reduce la complejidad de la implementación del control térmico del dado extrusor.

5.2. Diseñar un sistema de extrusión y de control de temperatura que permita el monitoreo del proceso

A partir del análisis previo de distintos perfiles sólidos aplicables al PEAD reciclado, se llevó a cabo el diseño del dado extrusor. Este diseño consideró aspectos como la geometría del perfil, la compatibilidad entre el material, el equipo y el perfil seleccionado, así como los criterios térmicos y estructurales necesarios para asegurar una extrusión estable y controlada. Asimismo, se establecieron los requerimientos técnicos del sistema de control de temperatura que forma parte del conjunto, permitiendo su integración con funciones de monitoreo del proceso.

5.2.1. Diseño y desarrollo de la sección 40×40

El diseño parte de un modelado CAD que integra la transición curva entre el estrechamiento anterior y la salida cuadrada. Los pasos clave son:

1. **Definición geométrica.** Se introduce un radio de arco de transición $R_t = 10\text{ mm}$ para suavizar el cambio de sección, reduciendo gradientes de presión según la ecuación de Bernoulli y los coeficientes de pérdidas por desaceleración:

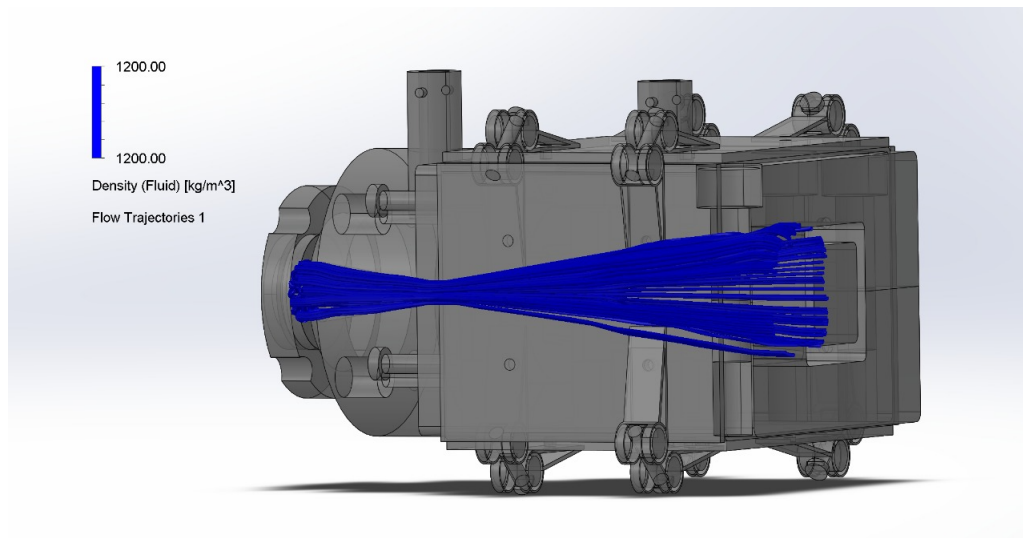
$$\Delta p \approx \frac{1}{2} \rho (v_{\text{entrada}}^2 - v_{\text{salida}}^2),$$

$$\text{donde } v_{\text{entrada}} = \frac{Q}{A_{\text{estrecho}}} \text{ y } v_{\text{salida}} = \frac{Q}{1600\text{ mm}^2}.$$

2. **Simulación de flujo.** Se realizó un análisis CFD rápido que confirma la ausencia de recirculaciones significativas y un perfil de velocidades suave en toda la cara de salida. La densidad permaneció cercana a 1200 kg/m^3 sin variaciones abruptas.
3. **Integración térmica.** Se incorpora un sistema de control de temperatura en las paredes laterales del dado, asegurando una distribución homogénea de la temperatura y evitando gradientes que podrían afectar la viscosidad del polímero.
4. **Verificación mecánica.** Análisis de elementos finitos sencillo demuestra que la sección de $40 \times 40 \text{ mm}$ resiste las presiones internas sin deformaciones mayores a $0,1 \text{ mm}$, manteniendo la precisión dimensional.

Figura 3

Densidad de fluido.



Nota: Se puede observar la densidad de fluido que genera el dado extrusor.

5.2.2. Sistema de extrusión

Para la fabricación del dado extrusor se seleccionó acero H13, conforme a la norma ISO 4957, un acero de herramienta al cromo-molibdeno-vanadio ampliamente utilizado en aplicaciones de extrusión y moldeo. Este material presenta una excelente combinación de resistencia a la fatiga térmica, alta dureza incluso a temperaturas elevadas, y buena conductividad térmica,

lo que permite mantener un control térmico estable en condiciones de trabajo exigentes. Específicamente, el acero H13 posee una dureza típica de 44–52 HRC, una resistencia a la tracción superior a 1.400 MPa, y puede operar de manera confiable hasta temperaturas de 600 °C, lo cual lo convierte en una opción ideal para componentes sometidos a ciclos térmicos repetitivos, como el dado propuesto.

En función del perfil cuadrado de 40×40 mm definido previamente y los requerimientos del proceso de extrusión, se desarrolló el diseño detallado de un dado cuya geometría interna permite conformar dicho perfil, con un espesor de pared aproximado de 5 mm. Considerando la expansión del polímero fundido a la salida, se estableció una abertura interna de 26 × 26 mm y una abertura externa de 36 × 36 mm, con el fin de asegurar que el perfil extruido alcance las dimensiones finales deseadas tras el enfriamiento.

La entrada del dado presenta un diámetro de 20 mm, compatible con la boquilla de salida de la extrusora COLLIN Teach-Line E 20 T. Las dimensiones externas del dado son de 100 mm de ancho por 70 mm de alto, lo que permite su fijación mecánica mediante tornillería estandarizada conforme a la norma ISO 4762, garantizando la rigidez estructural necesaria para soportar las presiones generadas durante el proceso.

Para la unión de las dos partes principales del dado se seleccionaron tornillos M10×40 mm, los cuales ofrecen una sujeción robusta y confiable, adecuada para resistir tanto las cargas mecánicas como las térmicas del sistema. La elección de esta medida específica responde a un equilibrio entre facilidad de montaje, capacidad de carga y disponibilidad comercial, además de garantizar una distribución uniforme de la presión y minimizar posibles fugas en la línea de separación del dado. Se realizó el cálculo de resistencia mecánica de los tornillos seleccionados, verificándose que la configuración propuesta soporta adecuadamente las fuerzas generadas durante la operación de extrusión. Dicho análisis consideró un factor de protección de 60, lo que implica que los tornillos pueden resistir hasta 60 veces la carga máxima estimada, asegurando la integridad del ensamblaje ante picos de presión y condiciones exigentes de trabajo.

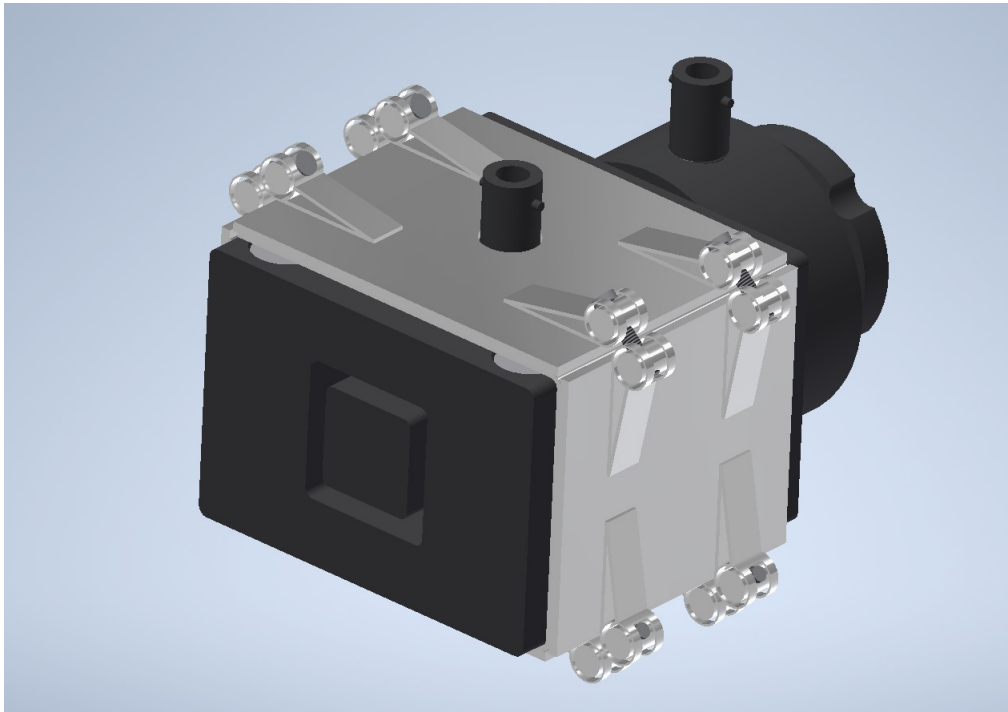
El diseño mecánico está conformado por tres piezas principales: una tapa superior, una pieza inferior y un bloque central que define el canal de flujo del polímero fundido. Esta configuración modular no solo facilita el proceso de fabricación y montaje, sino que también permite una limpieza eficiente y la eventual sustitución de partes específicas si se requiere ajustar el diseño.

El conjunto fue modelado en un entorno CAD 3D, lo cual permitió validar su compatibilidad dimensional con la extrusora y revisar anticipadamente aspectos estructurales y térmicos. Este modelo servirá de base para simulaciones de flujo y pruebas experimentales que permitan

confirmar su desempeño bajo condiciones reales de operación, en el marco del procesamiento de polímeros reciclados. En la Figura 4 se puede observar el diseño propuesto.

Figura 4

Diseño propuesto del dado extrusor.



Nota: Se puede observar el diseño propuesto del dado extrusor en simulación CAD.

5.2.3. Sistema de control de temperatura

En este estudio se utilizó una extrusora equipada con un sistema de control de temperatura que emplea controladores PID integrados de fábrica, los cuales gestionan de forma individual cada una de sus zonas térmicas. Como parte del desarrollo de un nuevo dado para este equipo, se consideró esencial analizar y verificar el comportamiento térmico real del sistema bajo condiciones de operación, con el objetivo de asegurar que las temperaturas en las zonas críticas permanezcan dentro del intervalo óptimo para el procesamiento de materiales poliméricos reciclados.

Para llevar a cabo esta evaluación, se seleccionaron dos zonas representativas: Zona 4, con un setpoint de 170°C, y Zona 5, con un setpoint de 210°C. Se aplicó una señal de entrada

tipo escalón, y se registraron las temperaturas resultantes cada 60 segundos, hasta alcanzar el estado estacionario. A partir de estas mediciones se modeló el sistema térmico como una función de transferencia de primer orden con retardo (FOPDT), una aproximación válida y ampliamente empleada en procesos con alta inercia térmica. El modelo adoptado fue:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls}$$

donde:

- K es la *ganancia estática* del proceso.
- τ es el *tiempo característico* o de respuesta.
- L es el *tiempo de retardo*.

Estimación de parámetros del modelo FOPDT

A partir de las curvas de respuesta térmica, se estimaron los tres parámetros principales del modelo:

1. **Ganancia del proceso** (K):

Se calculó con la expresión:

$$K = \frac{\Delta T}{(\text{pendiente inicial}) \times t_c \times 100}$$

donde:

- $\Delta T = T_{\text{sp}} - T_i$ es el cambio total de temperatura.
- La pendiente inicial se obtuvo como la media de las primeras cinco diferencias de temperatura dividida entre el intervalo de muestreo (60s).
- $t_c = 150$ es un factor empírico utilizado para compensar la dinámica térmica lenta del sistema.

2. **Tiempo característico** (τ):

Se identificó como el instante en el que la respuesta alcanza el 63.2% del valor total de cambio:

$$T_{63.2} = T_i + 0.632 \cdot \Delta T$$

Mediante interpolación lineal entre los puntos adyacentes a este valor, se obtuvo el tiempo $t_{63.2}$ correspondiente.

3. Tiempo de retardo (L):

Se estimó mediante la interpolación del valor al 28.3% del cambio total:

$$T_{28.3} = T_i + 0.283 \cdot \Delta T$$

Aplicando la fórmula:

$$L = t_{28.3} - \frac{t_{63.2} - t_{28.3}}{2}$$

se obtuvo el valor aproximado del retardo del sistema.

Estimación de parámetros PID teóricos

Con los valores obtenidos de K , τ y L , se estimaron los parámetros del controlador PID utilizando una adaptación del método clásico de Ziegler–Nichols, específicamente ajustado para procesos térmicos lentos. Las expresiones empleadas fueron:

$$K_p = \frac{1,2 \cdot \tau}{K \cdot L} \cdot \alpha$$

$$T_i = 2,0 \cdot L \cdot \beta$$

$$T_d = 0,5 \cdot L \cdot \gamma$$

donde α , β y γ son coeficientes empíricos ajustados con base en la respuesta real observada. Por ejemplo, para la Zona 4 se utilizaron $\alpha = 0,85$, $\beta = 1,18$ y $\gamma = 0,82$.

Aunque el sistema ya contaba con controladores PID preinstalados, este procedimiento permitió validar su desempeño y aproximar su configuración interna, evidenciando que los parámetros utilizados por el fabricante se ajustan adecuadamente al comportamiento dinámico del sistema.

5.3. Determinar los costos unitarios asociados a la fabricación e implementación de un dado extrusor con control de temperatura

Como parte del proceso de validación técnico-económica del diseño, se procedió a estimar los costos unitarios asociados a la fabricación e implementación del dado extrusor con control

de temperatura. Esta estimación contempló materiales, procesos de manufactura, integración de sensores, herramientas, mano de obra, transporte y un margen adicional por imprevistos.

5.3.1. Selección del material

Se seleccionó acero H13 conforme a la norma ISO 4957, debido a su excelente resistencia al desgaste, estabilidad térmica y propiedades mecánicas. Este material presenta una dureza típica entre 44 y 52 HRC, una resistencia a la tracción superior a 1.400 MPa, y puede operar de forma confiable hasta temperaturas de 600°C, lo que lo hace ideal para componentes sometidos a ciclos térmicos repetitivos.

El volumen fue estimado a partir del modelo CAD en aproximadamente 6,000 cm³, lo que corresponde a una masa de 47 kg. El costo del material fue calculado con base en un valor comercial de \$7,50 USD/kg, resultando en un total de \$352,50 USD.

Tabla 2

Costo estimado del material (acero H13)

Parámetro	Valor	Unidad/Costo [USD]
Volumen total estimado	6.000	cm ³
Densidad del acero H13	7,80	g/cm ³
Masa total estimada	47,0	kg
Costo por kilogramo	—	\$7,50/kg
Costo total del material	—	\$352,50

5.3.2. Proceso de fabricación tercerizado

El mecanizado fue considerado bajo modalidad tercerizada, empleando máquinas CNC de 3 ejes. Se estimó un tiempo total de 14 horas de mecanizado, a un costo de \$50,00 USD/hora, incluyendo operario, consumo energético y desgaste de herramientas. Además, se incorporó un cargo adicional de \$60,00 USD por configuración inicial (setup), alcanzando un total de \$760,00 USD.

Tabla 3*Estimación del tiempo y costo por mecanizado tercerizado*

Concepto	Valor	Unidad/Costo [USD]
Horas estimadas de mecanizado	14 h	
Tarifa por hora de mecanizado	—	\$50,00/h
Costo por mecanizado (14 h)	—	\$700,00
Cargo por setup y programación	—	\$60,00
Total mecanizado tercerizado	—	\$760,00

5.3.3. Costos adicionales

Además del material y el mecanizado, se incorporaron los siguientes costos complementarios:

- **Tornillos M10×40 mm (acero niquelado):** \$12,00 USD (juego completo).
- **Sensores de temperatura tipo termopar:** \$30,00 USD (2 unidades).
- **Placas de fijación y montaje estructural:** \$40,00 USD.
- **Herramientas menores y materiales auxiliares:** \$20,00 USD.
- **Software CAD y simulación (licencia compartida):** \$25,00 USD (estimación proporcional).
- **Mano de obra técnica (ensamblaje e instrumentación):** \$80,00 USD.
- **Transporte y logística local:** \$35,00 USD.

5.3.4. Margen por imprevistos

Para cubrir posibles desviaciones en los costos reales, se añadió un margen del 20% sobre el subtotal de los costos directos, considerando imprevistos técnicos, logísticos o de adquisición de componentes.

6. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo del proyecto, de acuerdo con los objetivos específicos planteados.

6.1. Establecimiento de las especificaciones técnicas para el diseño de un dado extrusor con control de temperatura

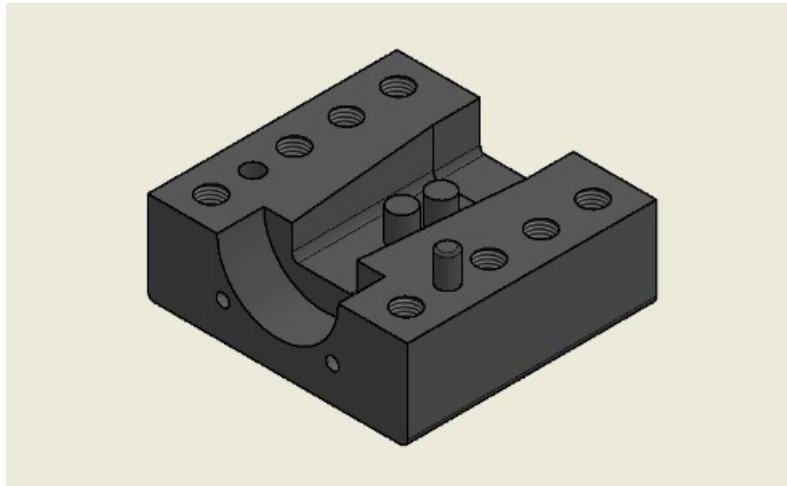
Como parte fundamental del desarrollo del proyecto, se caracterizó la extrusora COLLIN TEACH-LINE E 20 T para establecer los límites operativos y las condiciones necesarias para la extrusión de PEAD reciclado. El equipo analizado, de tipo laboratorio, posee un tornillo de 20 mm de diámetro con relación L/D de 25:1, tres zonas térmicas calefaccionadas y un control preciso de velocidad y temperatura, lo que lo hace adecuado para estudios experimentales con materiales reciclados.

Se identificaron las principales variables del proceso (temperatura, presión, velocidad del tornillo, torque y consumo energético) y su impacto en la calidad del fundido y la estabilidad dimensional del producto. Estas variables fueron correlacionadas con el comportamiento reológico del PEAD reciclado, cuyo índice de fluidez (MFI) tiende a aumentar con cada ciclo de reprocesamiento, reduciendo la viscosidad y alterando el perfil viscoelástico del material.

Mediante el análisis comparativo de perfiles sólidos extruidos (tipo H, tipo C y perfil cuadrado), se determinó que la geometría de sección cuadrada ofrece una buena distribución de tensiones, simplicidad de fabricación y compatibilidad con el volumen de procesamiento de la extrusora. Esto permitió definir un perfil cuadrado de 40×40 mm con un espesor de pared de aproximadamente 5 mm como se muestra en la figura 5.

Figura 5

Perfil cuadrado.

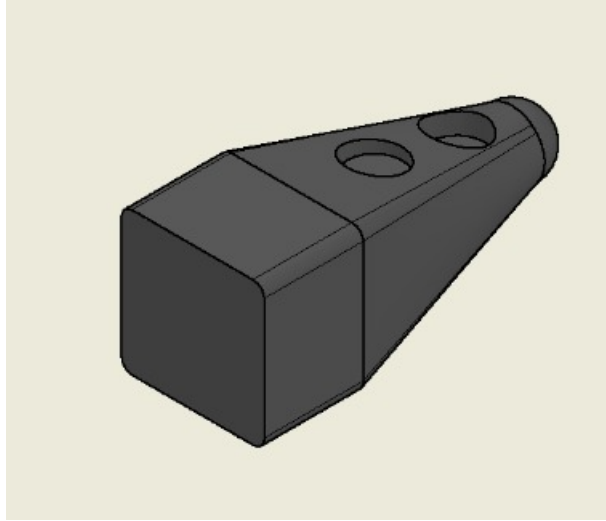


Nota: Se puede observar el perfil cuadrado del dado extrusor.

Las dimensiones del dado se establecieron considerando una abertura interna de 26×26 mm para compensar la expansión del polímero fundido al salir del canal, así como una sección de land de 18 mm para estabilizar la presión previa a la salida. Se incluyeron radios internos de 2 mm para evitar concentraciones de tensión y favorecer la salida del perfil como se muestra en la figura 6.

Figura 6

Abertura interna.



Nota: Se puede observar la abertura interna del dado extrusor.

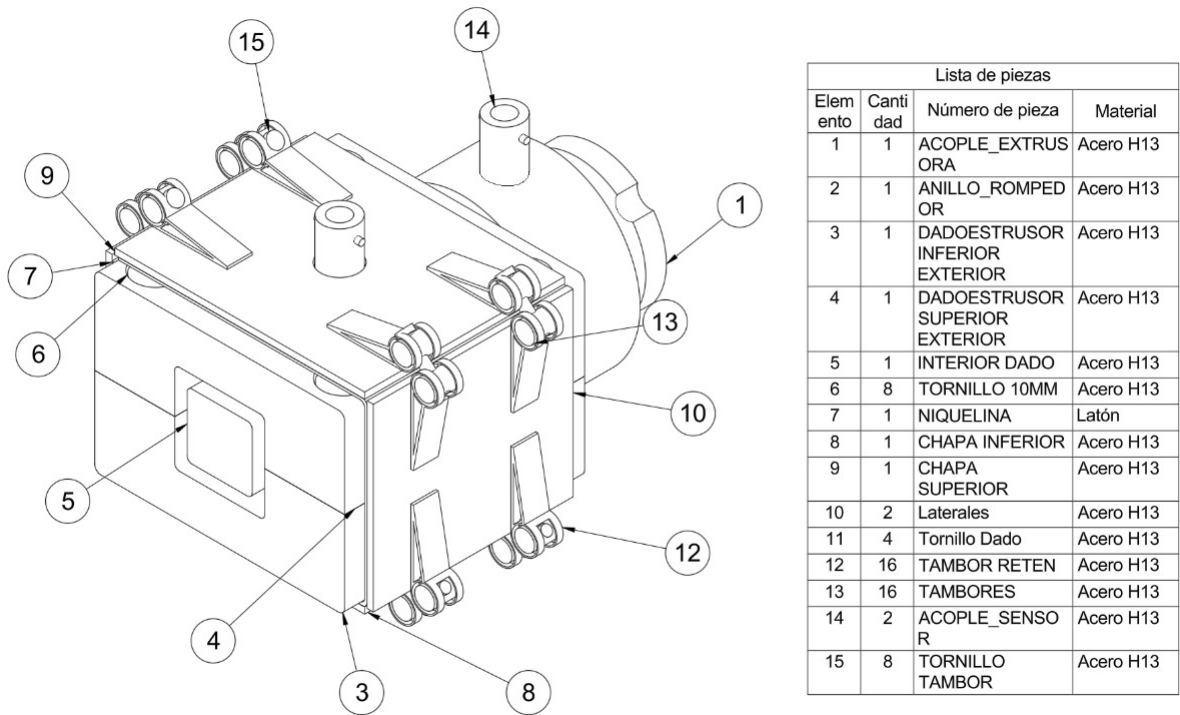
Este conjunto de especificaciones técnicas fue validado mediante modelado CAD del dado y su compatibilidad con las capacidades térmicas y mecánicas de la extrusora COLLIN. Así, se logró establecer una base técnica sólida para el diseño de un dado extrusor, adaptado al procesamiento del polímero reciclado, cumpliendo plenamente con el objetivo planteado.

6.2. Diseño de un sistema de extrusión y de control de temperatura que permita el monitoreo del proceso

A partir del modelado tridimensional del dado extrusor, se realizó una evaluación detallada de su geometría interna y externa, validando la compatibilidad dimensional con la extrusora COLLIN Teach-Line E 20 T. En la Figura 7 se presenta el modelo CAD 3D final, en el que se identifican claramente las tres piezas principales: tapa superior, bloque central y base inferior.

Figura 7

Modelo 3D del dado extrusor.

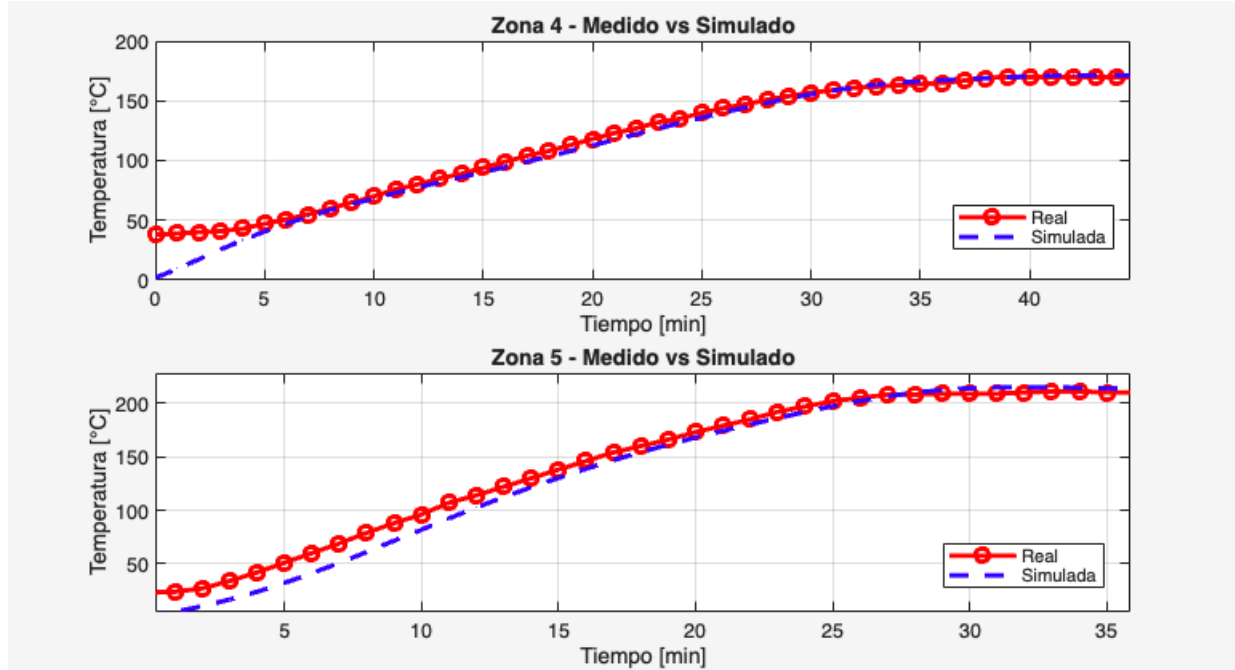


Nota: Se puede observar el modelo 3D del dado extrusor diseñado y sus piezas.

Se realizó el análisis de las curvas de respuesta térmica obtenidas para las Zonas 4 y 5 que se muestran en la Figura 8. Ambas evidencian una respuesta típica de primer orden con retardo, confirmando la validez de la aproximación FOPDT.

Figura 8

Comportamiento térmico en Zona 4 y Zona 5.



Nota: Las mediciones se realizaron cada 60 segundos desde el arranque del sistema hasta alcanzar el estado estacionario.

Los parámetros estimados para cada zona se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4

Parámetros FOPDT y PID estimados para zonas térmicas.

Zona	K	τ [s]	L [s]	K_p	T_i, T_d [s]
Zona 4	1,20	420	65	3,02	153,4 26,65
Zona 5	1,45	390	60	2,57	141,6 24,60

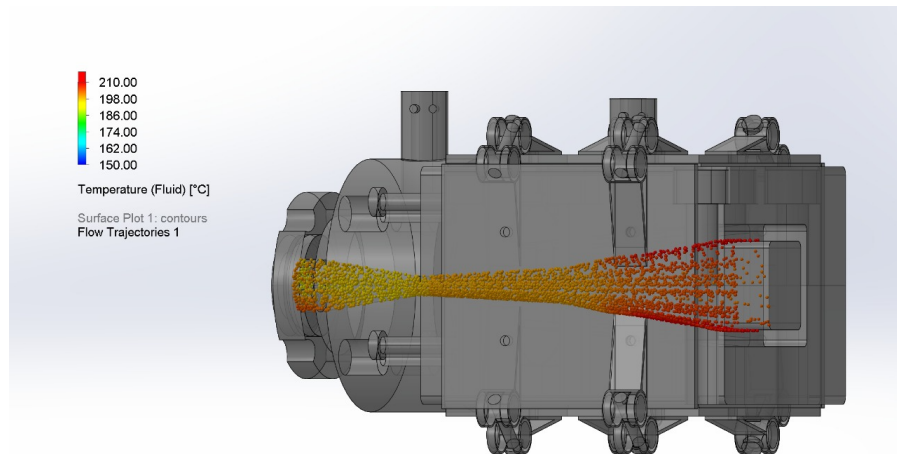
Como puede observarse, la Zona 5 presenta una ganancia ligeramente mayor, así como una respuesta algo más rápida que la Zona 4, coherente con su mayor setpoint térmico. La correcta estimación de estos parámetros permitió evaluar de manera indirecta el desempeño de los controladores PID integrados, concluyendo que la configuración por defecto cumple con los requerimientos dinámicos del proceso.

Como parte del proceso de validación del diseño del dado extrusor, se realizaron simulaciones térmicas orientadas a evaluar el comportamiento del fluido polimérico durante el proceso de extrusión, así como la distribución de temperatura en los componentes metálicos del dado.

La Figura 9 muestra la trayectoria del fluido fundido al interior del dado, representando la distribución térmica a lo largo de su recorrido. Se observa una gradiente térmica que va desde aproximadamente 150°C hasta 210°C. El incremento de temperatura hacia la zona de salida del dado indica una transferencia de calor efectiva desde las resistencias térmicas al fluido, lo que permite alcanzar una viscosidad óptima para la conformación del perfil extruido. La uniformidad de la temperatura en el tramo final sugiere un diseño adecuado de la geometría interna y de la distribución del flujo térmico.

Figura 9

Distribución térmica del fluido fundido en el interior del dado extrusor.



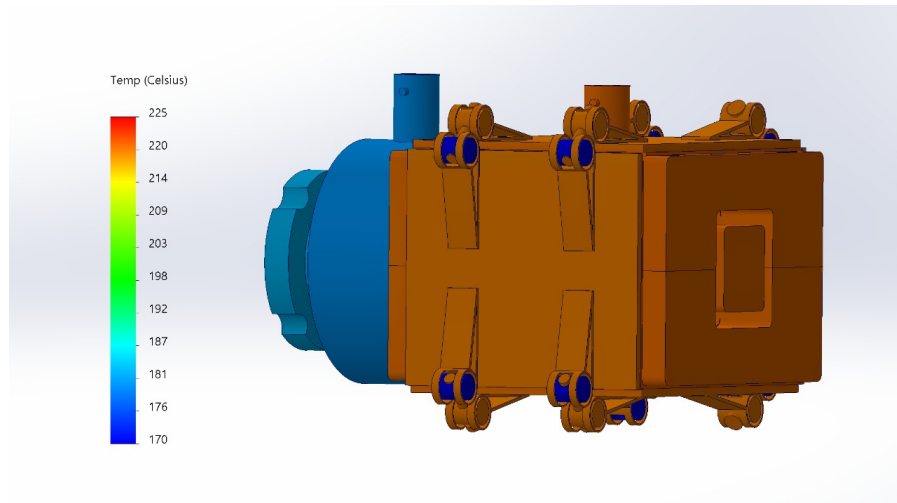
Nota: Se puede observar la distribución e incremento gradual térmico del fluido.

En la Figura 10, se presenta el análisis térmico del cuerpo del dado, el cual fue simulado como un volumen sólido con condiciones de contorno térmicas correspondientes a las zonas calefactoras instaladas. La temperatura superficial oscila entre 170°C y 225°C, concentrándose los valores más elevados en la zona central del dado, donde ocurre el contacto más directo con el polímero. Esta distribución es coherente con el diseño del sistema de calefacción, que prioriza la estabilidad térmica en las zonas críticas para garantizar una extrusión continua y uniforme. Las zonas más frías, próximas a las entradas y salidas del dado, se corresponden con

superficies de disipación térmica y elementos estructurales que no están en contacto directo con el flujo del material.

Figura 10

Distribución de temperatura en el cuerpo del dado extrusor.



Nota: Se puede observar la distribución uniforme de temperatura deseada en el cuerpo del dado.

Estos resultados confirman que tanto el diseño interno como el sistema de calefacción del dado permiten mantener un control térmico adecuado, asegurando condiciones homogéneas de procesamiento para el PEAD reciclado.

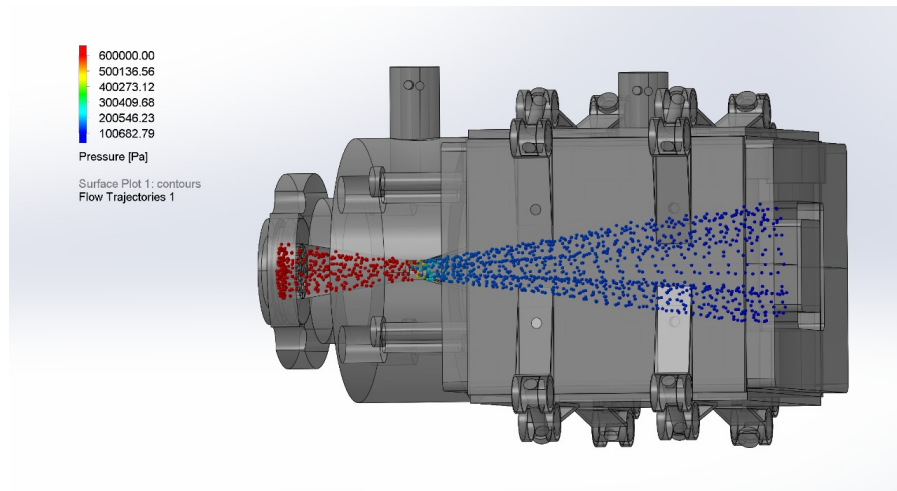
Para garantizar la sujeción adecuada de las dos mitades del dado extrusor, se seleccionaron pernos M10×40 mm conforme a la norma ISO 4762. Con base en los cálculos de resistencia mecánica realizados, se determinó que esta tornillería es capaz de soportar esfuerzos considerablemente mayores a los generados durante el proceso de extrusión. Se aplicó un factor de protección de 60, lo que indica que los pernos pueden resistir hasta 60 veces la carga máxima estimada, proporcionando un amplio margen de seguridad ante posibles picos de presión y condiciones de operación exigentes.

Esta validación fue reforzada mediante el análisis CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), cuya visualización se muestra en la Figura 11. En ella se representa la distribución de presión en el interior del dado, alcanzando valores máximos de hasta 600,000 Pa en la zona de entrada, y disminuyendo progresivamente a lo largo del canal de flujo. La gráfica confirma

que las mayores concentraciones de presión se producen antes del estrechamiento del canal, lo cual coincide con la ubicación de los pernos de sujeción.

Figura 11

Distribución de presión interna en el dado extrusor.



Nota: Se observan presiones máximas de hasta 600,000 Pa en la zona de entrada, disminuyendo progresivamente hacia la salida.

Dado que estos valores se mantuvieron por debajo de los límites permisibles según el análisis de resistencia, y considerando el sobredimensionamiento aplicado, se concluye que la configuración de los pernos M10×40 mm garantiza la integridad mecánica de la unión del dado. Esto asegura que la estructura mantendrá su estabilidad incluso ante aumentos repentinos de presión generados durante la extrusión de materiales reciclados de alta viscosidad.

6.3. Determinar los costos unitarios asociados a la fabricación e implementación de un dado extrusor con control de temperatura

Los resultados del análisis económico indican que la fabricación e implementación del dado extrusor con control de temperatura presenta un **costo total estimado de \$1.625,40 USD**. Este valor incluye tanto los componentes mecánicos como los elementos de instrumentación, herramientas auxiliares, mano de obra y un margen del 20% destinado a cubrir imprevistos.

Del total, los costos más representativos corresponden al proceso de mecanizado (46,8%) y al material base (21,7%), lo que refleja la influencia de la manufactura de precisión al trabajar

con acero H13. No obstante, los costos asociados a sensores, tornillería, montaje y software representan una proporción menor del presupuesto, lo que favorece la viabilidad del proyecto desde el punto de vista técnico-económico.

En conjunto, los datos obtenidos validan la factibilidad de fabricar un sistema funcional y robusto sin requerir una inversión excesiva, manteniendo un equilibrio adecuado entre costo, calidad de materiales y desempeño del sistema propuesto para aplicaciones en extrusión de polímeros reciclados.

6.3.1. Resumen de costos

Tabla 5

Resumen de costos estimados del sistema propuesto

Concepto	Costo [USD]
Material base (acero H13)	\$352,50
Mecanizado tercerizado	\$760,00
Tornillos	\$12,00
Bandas térmicas	\$30,00
Sensores de temperatura	\$30,00
Placas de montaje	\$40,00
Herramientas y materiales menores	\$20,00
Software CAD y simulación	\$25,00
Mano de obra técnica	\$80,00
Transporte	\$5,00
Subtotal	\$1.354,50
Indirectos (20 %)	\$270,90
Costo total estimado	\$1.625,40

7. Cronograma y actividades

En la Tabla 6, se presenta la planificación de las actividades a ejecutar.

Tabla 6

Cronograma de actividades.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES																									
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDADES	MES 1				MES 2				MES 3				MES 4				MES 5							
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	HORAS			
Establecer las especificaciones técnicas para el diseño del dado extrusor con control de temperatura, considerando los requerimientos del proceso de extrusión.	Análisis de requisitos y especificaciones técnicas del dado de extrusión.	x	x																						20
	Definir los requerimientos técnicos para el control.			x	x																				20
Diseñar un sistema de extrusión y de control de temperatura que permita el monitoreo del proceso.	Diseño preliminar y modelado del dado de extrusión.				x	x	x																		30
	Evaluación del diseño mediante simulaciones y revisión técnica.							x	x	x															30
	Diseñar el sistema de integración de sensores en el dado extrusor.										x	x													20
	Integrar el sistema de control funcional del dado extrusor.											x	x	x	x										40
Determinar los costos unitarios asociados a la fabricación del dado extrusor con control de temperatura.	Identificar los materiales y componentes requeridas.															x	x								10
	Calcular los costos de manufactura.																	x	x						10
	Elaborar un análisis de costos unitarios.																			x	x				10
	Redacción de documento	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	60
Total de horas empleadas																							240		

Nota: La tabla presenta las actividades para cumplir con los objetivos planteados. La tabla puede ajustarse de acuerdo a la cantidad de objetivos y actividades que se requieran

8. Presupuesto

8.1. Talento humano

En esta sección se presenta el presupuesto destinado al talento humano requerido para la ejecución del proyecto. Para más detalles, consulte la tabla 7.

Tabla 7

Recurso de talento humano.

Cargo	Nombre	Costo hora	horas al mes	Total de horas	Costo total
Tutor	Eugenio Cardenas	20\$	4	20	400 \$
Autor 1	Juan Solano	10\$	48	240	2400 \$

8.2. Recursos materiales

En esta sección se detallarán los recursos materiales necesarios para el desarrollo del proyecto, se incluyen software, transporte, documentación y demás recursos requeridos para el desarrollo del presente proyecto como se observa en la tabla 8.

Tabla 8

Recurso de talento humano.

Denominación	Cantidad	Costo Unitario	Costo total
ANSYS	1	400	400 \$
INVENTOR	1	400	400 \$
TRANSPORTE	60	0.50	30 \$
DOCUMENTACIÓN	500	0.10	50 \$

8.3. Costos totales del proyecto de titulación

En esta sección se detallan los costos totales asociados al desarrollo del trabajo de titulación, incluyendo tanto los recursos de talento humano como los materiales necesarios. También se presenta un desglose completo de los gastos en la tabla 9.

Tabla 9

Recursos humanos y materiales del proyecto.

Denominación	Cantidad	Costo Unitario	Costo total
Recursos humanos			
Tutor (Eugenio Cárdenas)	20 horas	20	400 \$
Autor (Juan Solano)	240 horas	10	2400 \$
Recursos materiales			
ANSYS (licencia)	1	400 \$	400 \$
INVENTOR (licencia)	1	400 \$	400 \$
TRANSPORTE	60 viajes	0.50 \$	30 \$
DOCUMENTACIÓN	500 unidades	0.10\$	50 \$
TOTAL			3680 \$

9. Conclusiones

Se cumplió con éxito el primer objetivo al caracterizar la extrusora Collin Teach-Line E20T y establecer las dimensiones y parámetros clave del dado sensorizado. La selección del perfil cuadrado de 40×40 mm, con abertura interna de 26×26 mm, land de 18 mm y radios internos de 2 mm, garantiza un flujo uniforme y una geometría reproducible al procesar PEAD reciclado.

El segundo objetivo se alcanzó mediante el modelado CAD del dado, la integración de termopares y la configuración PID de dos zonas críticas 170 °C y 210 °C. La caracterización FOPDT y las simulaciones térmicas y de CFD demostraron que el sistema mantiene temperaturas estables 150–225 °C y presiones internas manejables de hasta

600 kPa asegurando homogeneidad en el material extruido.

Para el cumplimiento del tercer objetivo, se estimó un costo unitario total de \$1 625,40 USD, que incluye los siguientes rubros: adquisición del acero H13, procesos de mecanizado CNC, sensores (termocuplas), montaje, mano de obra especializada, materiales auxiliares, y transporte. Este valor confirma la factibilidad económica de fabricar e instrumentar el dado, contemplando además un margen del 20 % para imprevistos, con el fin de mitigar posibles variaciones en los costos del mercado y garantizar la sostenibilidad del proyecto. El presente trabajo logró diseñar y validar un dado de extrusión con control de temperatura para procesar polietileno de alta densidad (PEAD) reciclado en la extrusora *Collin Teach-Line E20T*. Se definieron y caracterizaron las especificaciones técnicas del dado (perfil cuadrado de 40 x 40, abertura interna de 26 x 26, *land* de 18, radios de 2), así como las condiciones térmicas y de control necesarias (termopares tipo K y ajustes PID validados mediante un modelo FOPDT). Las simulaciones térmicas y de dinámica de fluidos computacional (CFD) confirmaron una distribución homogénea de temperatura entre 150 y 225, y presiones internas seguras de hasta 600. Además, la evaluación económico-financiera, con un costo total estimado de \$1 625,40 USD (incluyendo materiales, mecanizado, sensores, montaje y transporte), demostró la viabilidad técnica y económica del diseño, incorporando un margen del 20 % para absorber posibles imprevistos. Este desarrollo mecatrónico integra componentes mecánicos, térmicos, electrónicos y de control en una solución modular y escalable. Se comprobó que el diseño no solo mejora la uniformidad y calidad del extrudado de PEAD reciclado, sino que también es adaptable a otros perfiles geométricos (como H y C) y a distintos materiales reciclados, ajustando los parámetros del proceso según sus propiedades reológicas. De este modo, se sientan las bases para implementar procesos de extrusión más sostenibles y eficientes en entornos industriales comprometidos con la economía circular.

10. Recomendaciones

Fabricar un prototipo real del dado y realizar ensayos de extrusión con PEAD reciclado para validar en la práctica las previsiones CAD, térmicas y de CFD. Registrar datos de temperatura, presión y calidad superficial del extrudado.

Se recomienda explorar futuras adaptaciones del diseño del dado a distintos perfiles geométricos (como H y C), escalando la sección transversal conforme a la relación caudal-capacidad de la extrusora. Asimismo, se sugiere evaluar la compatibilidad del

sistema con otros polímeros reciclados distintos al PEAD, ajustando las condiciones térmicas y mecánicas según las propiedades reológicas de cada material. Esto permitiría ampliar el rango de aplicación del dado y fortalecer su versatilidad en procesos de extrusión con materiales reciclados de diversas características.

Para reducir costos sin comprometer la calidad, se sugiere evaluar la fabricación del dado en materiales alternativos con tratamiento superficial, siempre que cumplan con los requisitos térmicos y mecánicos del proceso de extrusión.

Referencias

- Aali, M., y cols. (2018). Study of thermal and rheological properties in the extrusion of plastic materials: Effects of temperature control. *Materials Science and Engineering: A*, 735, 87–94. doi: 10.1016/j.msea.2018.08.024
- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., y Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (psw): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625–2643. doi: 10.1016/j.wasman.2009.06.004
- Arandes, J., Bilbao, J., y López, D. (2004). Reciclado de residuos plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 5(1), 28–45.
- Awaja, F., y Pavel, D. (2005). Recycling of pet. *European Polymer Journal*, 41(7), 1453–1477. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005
- Bogale, B. (2010). *Extrusion die design for plastic profiles* (Inf. Téc.). Tampere University of Technology. Descargado de <https://theseus.fi/handle/10024/21268>
- Brydson, J. A. (1999). *The extrusion of plastics* (2nd ed.). Oxford: Elsevier Advanced Technology.
- Campos, D., y Caraguay, E. (2021). *Diseño y construcción de un prototipo de máquina extrusora para fundir plástico pet reciclable con capacidad de 5 kg/h* [Tesis de grado]. Quito, Ecuador. Descargado de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20768>
- COLLIN Lab & Pilot Solutions. (2023a). Manual de la extrusora collin teach-line e 20 t [Manual de software informático]. Descargado de <https://www.collin.com/teach-line-e20t> (Documento interno)
- COLLIN Lab & Pilot Solutions. (2023b). Manual de operación collin teach-line e 20 t [Manual de software informático]. (Manual de usuario)
- Crawford, R. J. (1998). *Plastics engineering* (3rd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Dieter, G. E. (2000). *Mechanical metallurgy* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- GmbH, A. P. (2021). *Fundamentos de reología aplicada a polímeros*. Anton Paar Publishing.
- GmbH, C. L. . P. S. (2020). *Collin teach-line extruder e20t product brochure*. Descargado de <https://www.collin-solutions.com/>
- Groover, M. P. (2019). *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems* (6th ed.). Wiley.
- Hopewell, J., Dvorak, R., y Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364(1526), 2115–2126. doi: 10.1098/rstb.2008.0311
- Información técnica y especificaciones de collin teach-line e 20 t*. (2023). Sitio web de UPS.

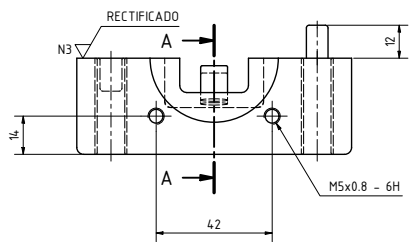
- Descargado de <https://www.ups.com/collin-extrusion>
- Ingeniería Química en el Perú. (2012, 24 de julio). *Extrusión de materiales plásticos*. <https://ingenieriaquimicaenelperu.blogspot.com/2012/07/extrusion-de-materiales-plasticos.html>. (Consultado el 10 de junio de 2025)
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2021). *Presentación residuos sólidos 2021*. Descargado de [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2021/Residuo_solidos_2021/Presentaci%C3%B3n%20residuos%202021%20v07JA_CGTP%20\(Rev%20%20CGTPE\)%20\(Rev.%20Dicos\).pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2021/Residuo_solidos_2021/Presentaci%C3%B3n%20residuos%202021%20v07JA_CGTP%20(Rev%20%20CGTPE)%20(Rev.%20Dicos).pdf) (Accedido: 23 de marzo de 2025)
- Kalpakjian, S., y Schmid, S. R. (2013). *Manufacturing engineering and technology* (7th ed.). Pearson.
- Levy, S. (1989). *Plastics extrusion technology handbook*. New York, NY: Industrial Press Inc.
- Lillford, P. J. (2008). Extrusion. En J. M. Aguilera y P. J. Lillford (Eds.), *Food materials science: Principles and practice* (pp. 415–435). New York, NY: Springer New York. Descargado de https://doi.org/10.1007/978-0-387-71947-4_18 doi: 10.1007/978-0-387-71947-4_18
- Liu, W., Zhang, H., y Chen, M. (2020). Processing and properties of recycled polyethylene for extrusion applications. *Polymer Engineering Science*, 60(10), 2330–2341. doi: 10.1002/pen.25528
- Martínez López, J. d. J., Barba Pingarrón, A., y Trujillo Barragán, M. (2009). Diseño de un dado para extrusión considerando el flujo del material. En *Memorias del xv congreso internacional anual de la somim* (p. 181). Cd. Obregón, Sonora, México: SOMIM. (Av. Universidad 3000 Col. Copilco Del. Coyoacán C.P. 04510)
- Migler, K. B., Lavalee, C., Dillon, M. P., Woods, S. S., y Gettinger, C. L. (2001). Visualizing the elimination of sharkskin through fluoropolymer additives: coating and polymer–polymer slippage. *Journal of Rheology*, 45(5), 565–581. doi: 10.1122/1.1380102
- Miller, E., y Rothstein, J. P. (2004). Control of the sharkskin instability in the extrusion of polymer melts using induced temperature gradients. *Rheologica Acta*, 44(2), 160–173. doi: 10.1007/s00397-004-0377-7
- Netzsch, R. (2022). Medición del Índice de fluidez (mfi) en polímeros. *Revista Técnica Netzsch*, 15(3), 45–52.
- Ortiz-Hernandez, C., Troncoso-Palacio, A., Acosta-Toscano, D., Begambre-Meza, R., y Troncoso-Mendoza, B. (2019, December). Utilización de herramientas de calidad para la mejora en los procesos de extrusión de plásticos. *Boletín de Innovación, Logística y Operaciones*, 1(1), 1–7. Descargado de <https://revistascientificas.cuc.edu.co/>

- bilo/article/view/2778 doi: 10.17981/bilo.01.01.2019.01
- Pfaendner, R. (2015). Processability and long-term properties of recycled polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 123, 105–114.
- Plastics – extrusion of pipes, profiles and sheets – part 1: General principles* (n.º ISO 11403-1:2013). (2013). (<https://www.iso.org/standard/55523.html>)
- Pospisil, J. P. (2005). *Extrusion: The definitive processing guide and handbook* (1st ed.). Munich: Hanser Publishers.
- Página oficial collin teach-line e 20 t.* (2023). Sitio web oficial. Descargado de <https://www.collin.com/teachline>
- Pérez, R. A., Torres, A., y Candal, M. V. (2013). Efecto de las variables del proceso de extrusión sobre la relación estructura-propiedades de películas tubulares de pebd. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 14(6), 257–274.
- Ragaert, K., Delva, L., y Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24–58. doi: 10.1016/j.wasman.2017.07.044
- Ramírez, J., y Martínez, L. (2018). Optimización del proceso de extrusión para perfiles de polietileno reciclado. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 19(2), 125–134. doi: 10.1016/j.ripol.2018.05.006
- Rauwendaal, C. (2014). *Polymer extrusion* (5th ed.). Munich, Cincinnati: Hanser Publishers.
- Restrepo, M., Cagüño, V., y Santamaría, R. (2007). *Estudio de las características físico-mecánicas de ladrillos elaborados con plástico reciclado en el municipio de acacías (meta)*. (Sin datos de revista o editorial)
- Resumen técnico de la extrusora collin teach-line e 20 t.* (2023). Descargado de <https://www.collin.com/teachline-summary> (Ficha técnica)
- RMIX Technical Reports. (2023). *Coextrusión y sensibilidad a la cizalla en polímeros*. Descargado de <https://www.rmix.com/coextrusion>
- Standard specification for polyethylene plastics extrusion materials for wire and cable* (n.º D3364-15). (2015). (<https://www.astm.org/d3364-15.html>)
- UNICEF Ecuador. (2023). *Reciclaje e inclusión para que la infancia viva en un ambiente más sano y seguro*. Descargado de <https://www.unicef.org/ecuador/historias/reciclaje-e-inclusi%C3%B3n-para-que-la-infancia-viva-en-un-ambiente-m%C3%A1s-sano-y-seguro> (Accedido: 23 de marzo de 2025)
- Wiles, D. M., y Scott, G. (2006). Polymer degradation and stability. *Polymer Degradation and Stability*, 91(7), 1581–1593. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2005.12.007

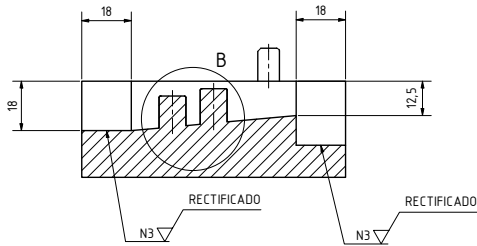
ANEXOS

Anexo A: Planos del dado extrusor

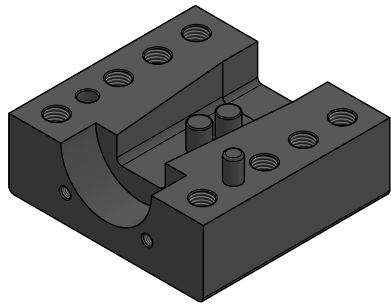
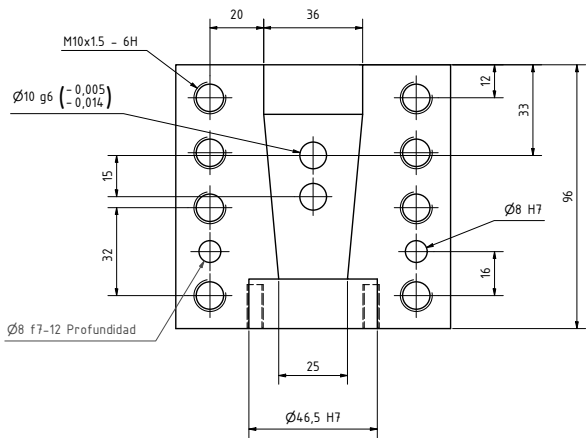
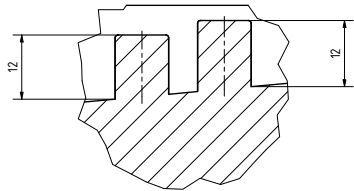
N7 ✓ (✓)



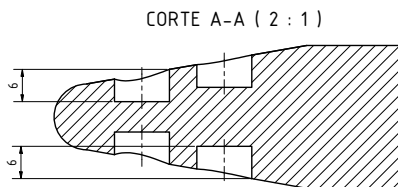
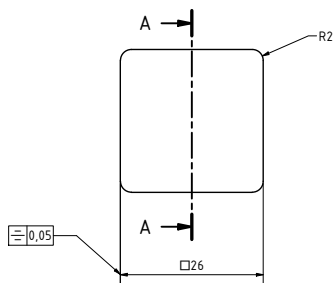
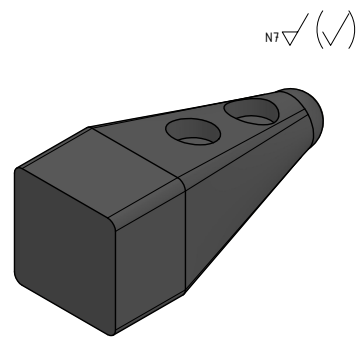
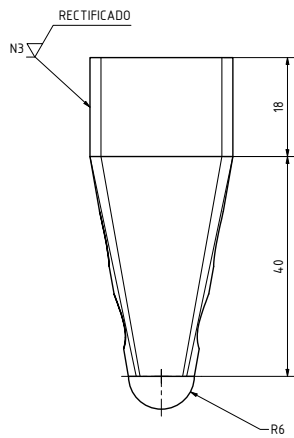
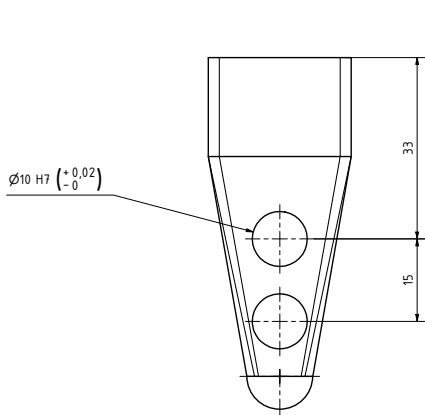
CORTE A-A (1 : 1)



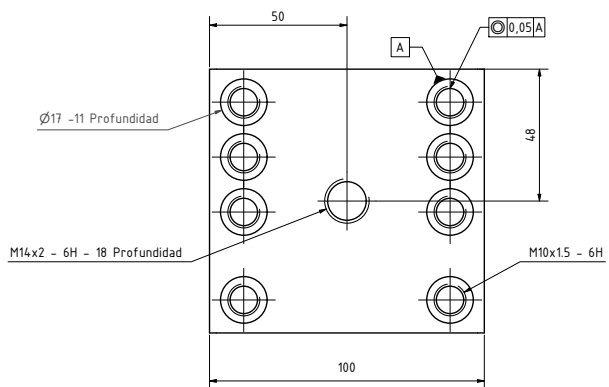
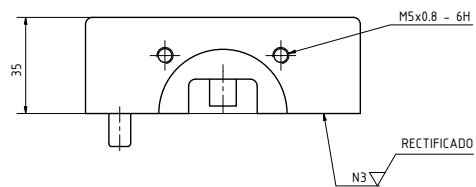
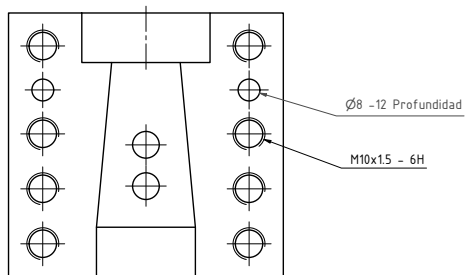
DETALLE B (2 : 1)



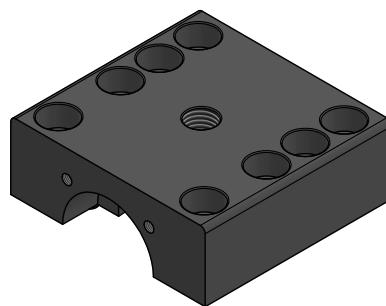
f	f	Inferior dado extrusor		Acero H13	ISO 4857	---
Pos.	Cant.	Denominación		Material	Norma	Notas
		Fecha	Nombre		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA INGENIERÍAS Carrera de Ingeniería Mecatrónica	
Dibujado	30/07/25	Juan Solano				
Comprobado	30/07/25	Ing. E. Cárdenas				
Laboratorio de Materiales Poliméricos						
Escala:	Tol. gen.:	Descripción:				
Lámina:	1 / 12	Plano de parte inferior de dado extrusor				



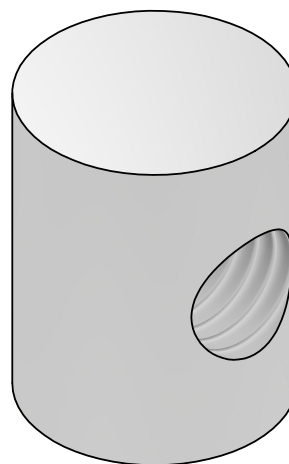
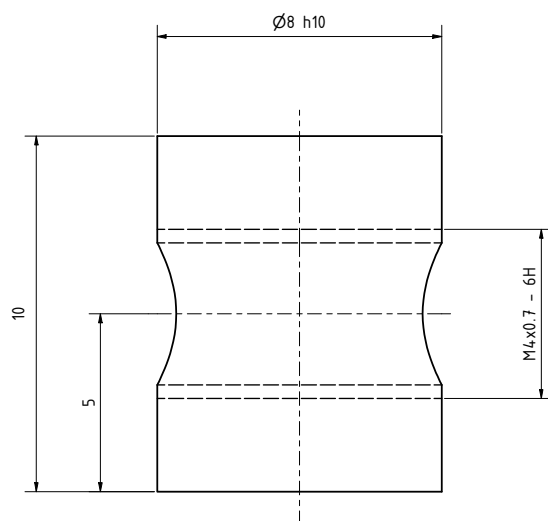
2	1	Interior dado extrusor		Acero H13	ISO 4857	----
Pos.	Cant.	Denominación		Material	Norma	Notas
		Fecha	Nombre	 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA INGENIERÍAS <i>Carrera de Ingeniería Mecatrónica</i>		
Dibujado	30/07/25	Juan Solano				
Comprobado	30/07/25	Ing. E. Cárdenas				
Laboratorio de Materiales Poliméricos						
Escala:	Tol. gen.:		Descripción:			
Lámina:	2 / 12		Plano de parte interior de dado extrusor			



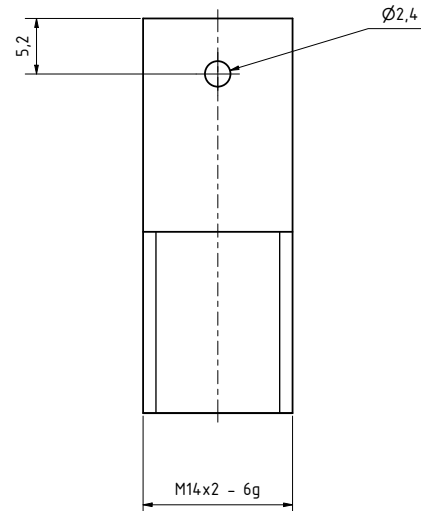
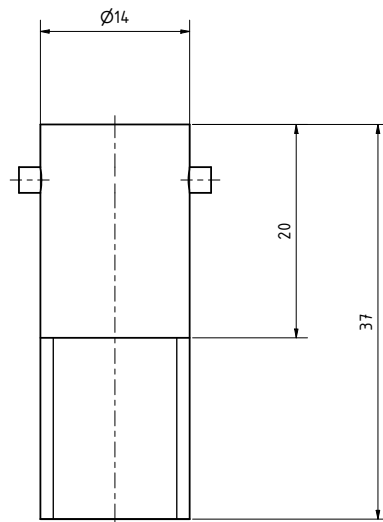
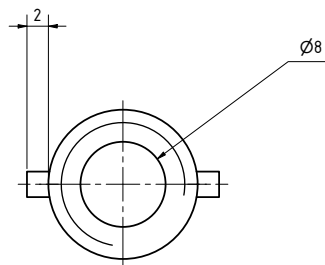
N7 ✓ (✓)



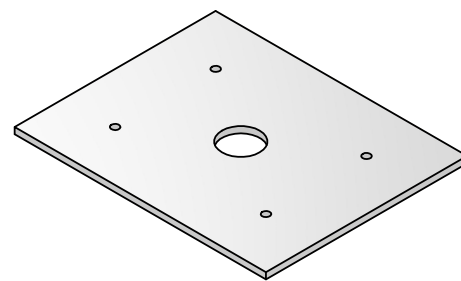
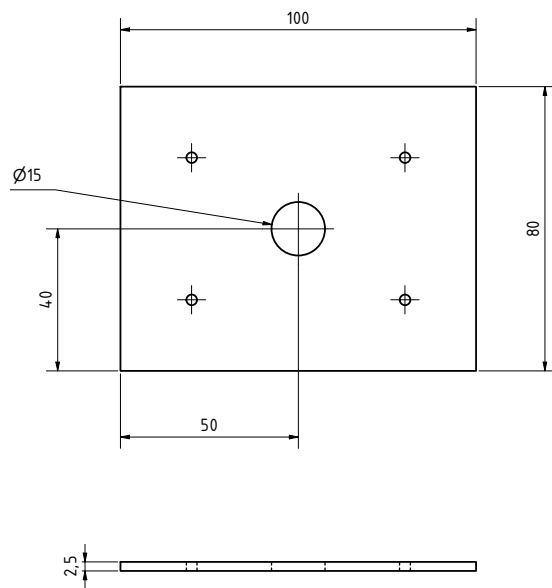
3	1	Superior dado extrusor		Acero H13	ISO 4957	-----
Pos.	Cant.	Denominación		Material	Norma	Notas
		Fecha	Nombre		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA INGENIERÍAS Carrera de Ingeniería Mecatrónica	
Dibujado	30/07/25	Juan Solano				
Comprobado	30/07/25	Ing. E. Cárdenas				
Laboratorio de Materiales Poliméricos						
Escala:	Tol. gen.:		Descripción:			
Lámina:	3 / 12		Plano de parte superior de dado extrusor			



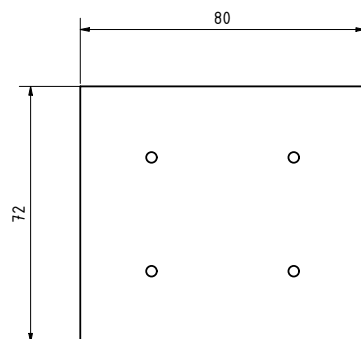
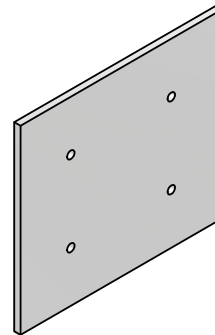
4	16	Tambores		Acero H13	ISO 4957	-----
Pos.	Cant.	Denominación		Material	Norma	Notas
		Fecha	Nombre		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA	
Dibujado	30/07/25	Juan Solano				
Comprobado	30/07/25	Ing. E. Cárdenas				
Laboratorio de Materiales Poliméricos				INGENIERÍAS <i>Carrera de Ingeniería Mecatrónica</i>		
Escala:	Tol. gen.:	Descripción:				
Lámina:	4 / 12					
Tambores de soporte						



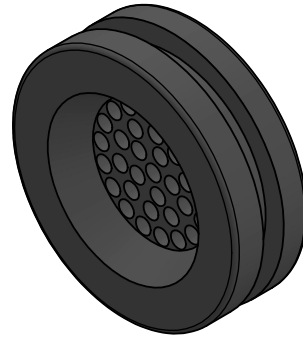
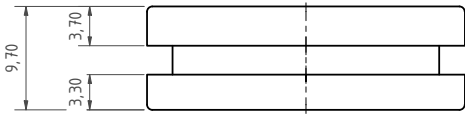
5	2	Acople sensor		Acero H13	ISO 4957	-----
Pos.	Cant.	Denominación		Material	Norma	Notas
		Fecha	Nombre		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA	
		Dibujado	30/07/25 Juan Solano			
		Comprobado	30/07/25 Ing. E. Cárdenas			
Laboratorio de Materiales Poliméricos				INGENIERÍAS Carrera de Ingeniería Mecatrónica		
Escala:	Tol. gen.:	Descripción:				
Lámina:	5/ 12	Acople de sensor de temperatura				



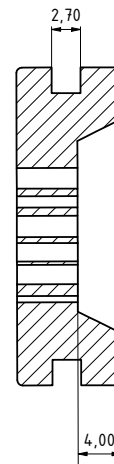
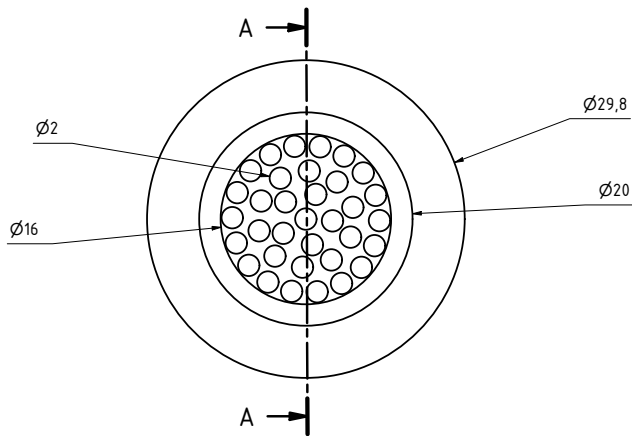
6	1	Chapa superior		Acero H13	ISO 4957	-----
Pos.	Cant.	Denominación		Material	Norma	Notas
		Fecha	Nombre		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA INGENIERÍAS Carrera de Ingeniería Mecatrónica	
Dibujado	30/07/25	Juan Solano				
Comprobado	30/07/25	Ing. E. Cárdenas				
Laboratorio de Materiales Poliméricos						
Escala:	Tol. gen.:	Descripción:				
Lámina:	6 / 12		Chapa superior de soporte			



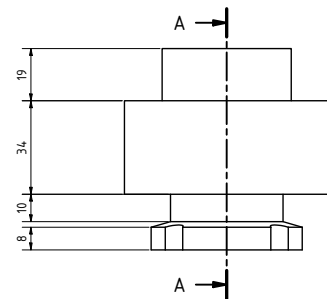
7	1	Chapa lateral		Acero H13	ISO 4957	-----
Pos.	Cant.	Denominación		Material	Norma	Notas
		Fecha	Nombre		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA INGENIERÍAS <i>Carrera de Ingeniería Mecatrónica</i>	
Dibujado	30/07/25	Juan Solano				
Comprobado	30/07/25	Ing. E. Cárdenas				
Laboratorio de Materiales Poliméricos						
Escala:	Tol. gen.:	Descripción:				
Lámina:	7 / 12	Chapa lateral de soporte				



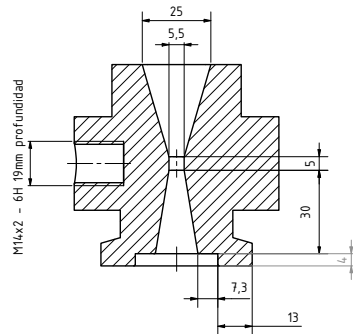
CORTE A-A (3: 1)



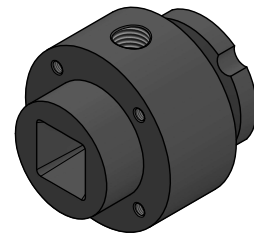
9	1	Anillo rompedor		Acero H13	ISO 4957	-----
Pos.	Cant.	Denominación		Material	Norma	Notas
		Fecha	Nombre		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA	
Dibujado		30/07/25	Juan Solano			
Comprobado		30/07/25	Ing. E. Cárdenas			
Laboratorio de Materiales Poliméricos				INGENIERÍAS Carrera de Ingeniería Mecatrónica		
Escala:	Tol. gen.:	Descripción:				
Lámina:	8 / 12	Anillo rompedor				



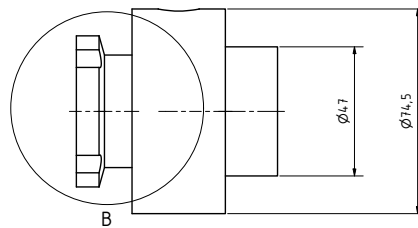
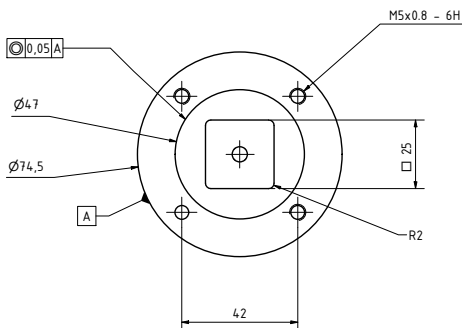
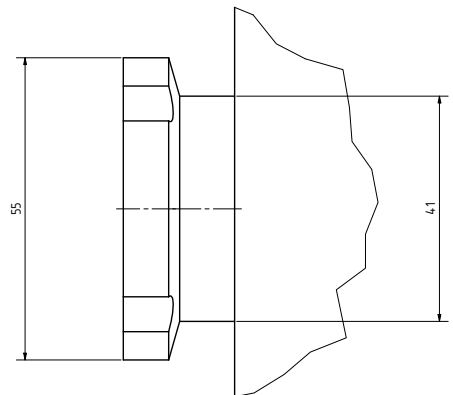
CORTE A-A (1 : 1)



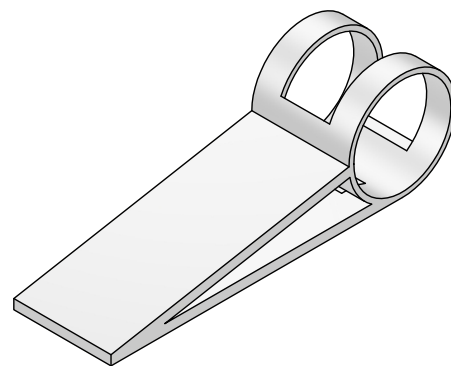
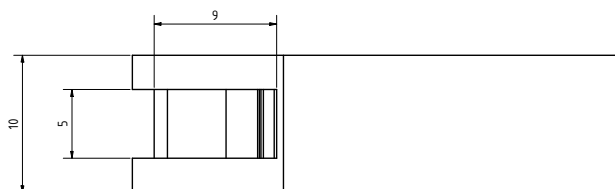
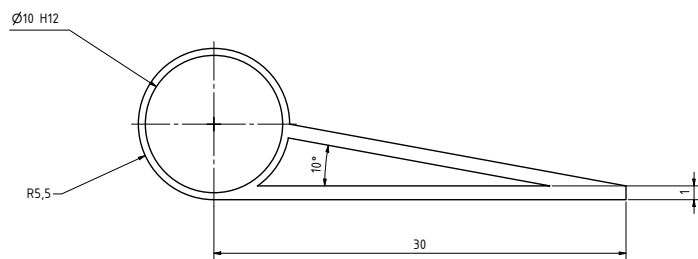
N7 ✓ (✓)



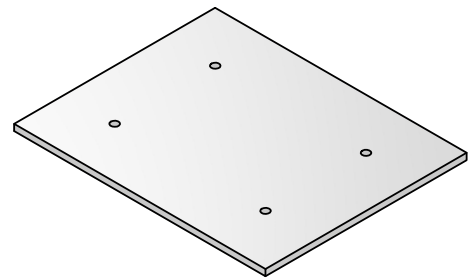
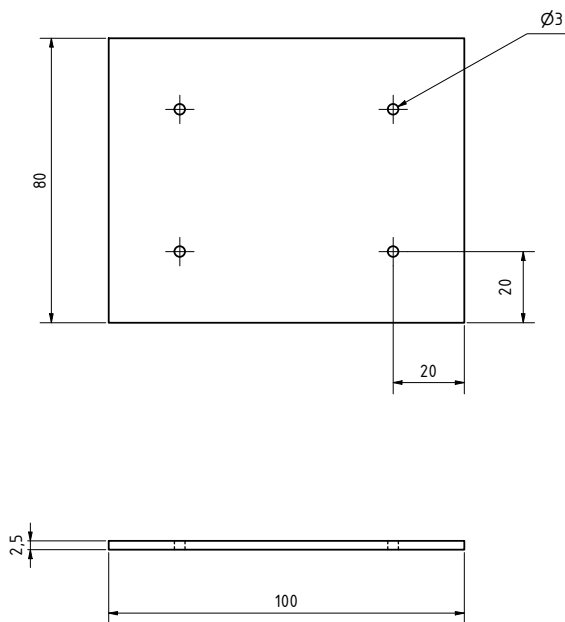
DETALLE B (2 : 1)



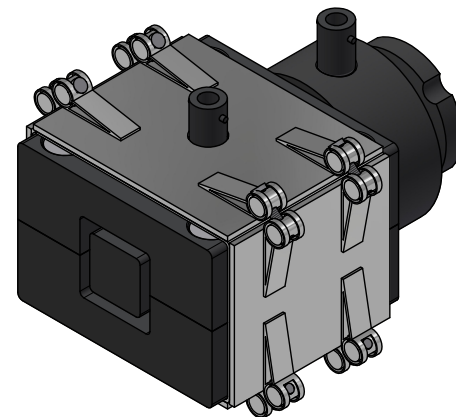
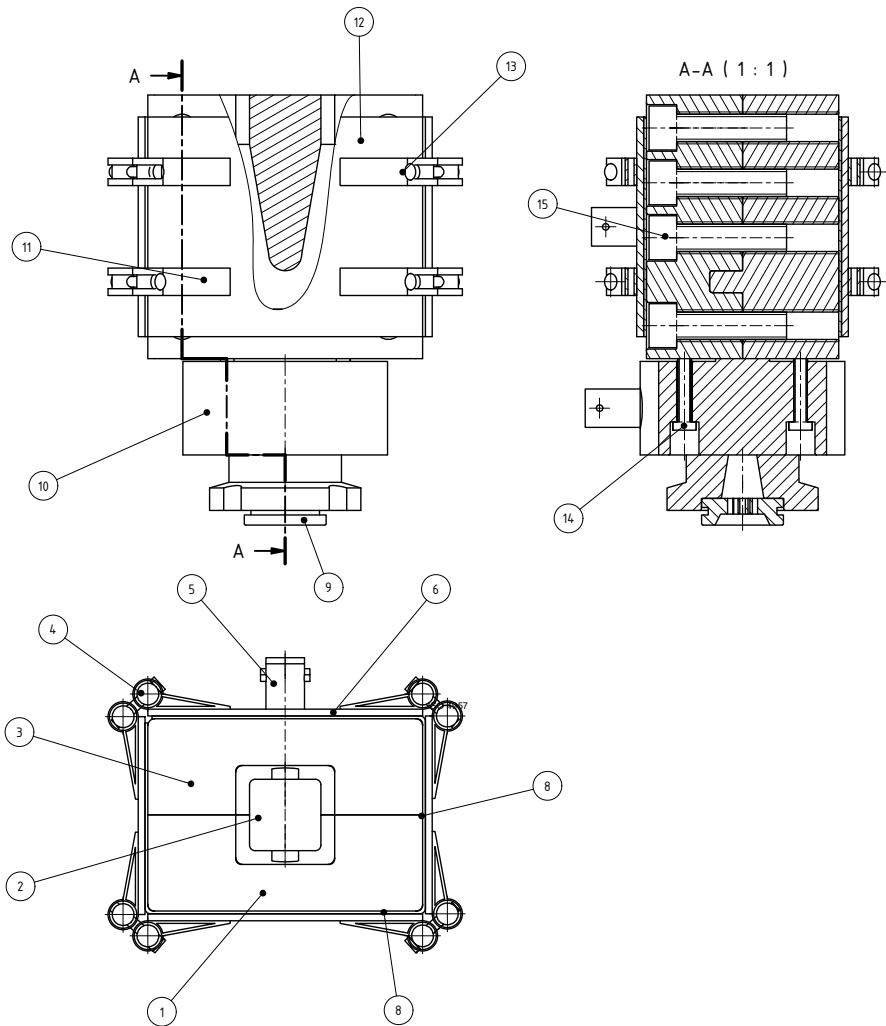
10	1	Acople extrusora		Acero H13	ISO 4957	-----
Pos.	Cant.	Denominación		Material	Norma	Notas
		Fecha	Nombre	 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA		
Dibujado	30/07/25	Juan Solano				
Comprobado	30/07/25	Ing. E. Cárdenas				
Laboratorio de Materiales Poliméricos				INGENIERÍAS Carrera de Ingeniería Mecatrónica		
Escala:	Tol. gen.:		Descripción:			
Lámina:	9 / 12					
Acople de extrusora a dado						



11	1	Tambor reten		Acero H13	ISO 4957	----
Pos.	Cant.	Denominación		Material	Norma	Notas
		Fecha	Nombre		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA INGENIERÍAS Carrera de Ingeniería Mecatrónica	
Dibujado	30/07/25	Juan Solano				
Comprobado	30/07/25	Ing. E. Cárdenas				
Laboratorio de Materiales Poliméricos						
Escala:	Tol. gen.:	Descripción:				
Lámina:	10 / 12	Retenedor del tambor de soporte				



12	1	Chapa Inferior		Acero H13	ISO 4957	-----
Pos.	Cant.	Denominación		Material	Norma	Notas
		Fecha	Nombre		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA INGENIERÍAS Carrera de Ingeniería Mecatrónica	
Dibujado	30/07/25	Juan Solano				
Comprobado	30/07/25	Ing. E. Cárdenas				
Laboratorio de Materiales Poliméricos						
Escala:	Tol. gen.:	Descripción:				
Lámina:	11 / 12	Chapa inferior de soporte				



15	8	Tornillo M10X40mm		ISO 4762	
14	4	Tornillo M5X35mm		ISO 4762	
13	8	Tornillo M4X20mm		ISO 4762	
12	1	Chapa inferior de soporte		ISO 4957	
11	16	Relendor del tambor		ISO 4957	
10	1	Acople de extrusora		ISO 4957	
9	1	Anillo compedor		ISO 4957	
8	1	Niquelina		ISO 4527	
7	2	Chapa lateral de soporte		ISO 4957	
6	1	Chapa superior de soporte		ISO 4957	
5	2	Acople de sensor		ISO 4957	
4	16	Tambores		ISO 4957	
3	1	Superior dado extrusor		ISO 4957	
2	1	Interior dado extrusor		ISO 4957	
1	1	Interior dado extrusor		ISO 4957	
Pos.	Cant.	Denominación	Material	Norma	Notas
		Fecha	Nombre	 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE: MATRIZ CUENCA INGENIERÍAS Carrera de Ingeniería Mecatrónica	
Dibujado		30/07/25	Juan Solano		
Comprobado		30/07/25	Ing. E. Cárdenas		
Laboratorio de Materiales Poliméricos					
Escala:	Tol. gen.:	Descripción:			
Lámina:	12 / 12				
Conjunto de dado extrusor					