

Diseño y cálculo de una máquina recicladora de plásticos ABS y PET para impresión 3D

Design and Calculation of a Recycling Machine for ABS and PET Plastics for 3D Printing

Miguel Ángel Castellón Medinaceli ¹ ✉ • Alvaro Murillo Torres ¹ • Luis Angel Muñoz Calizaya ² • José Luis Ramos Cortez ² • Marcelo Quispe Romero ²

Recibido: 16 de octubre 2025 / Revisado: 22 de diciembre / Aceptado: 27 de marzo 2026 / Publicado: 8 de mayo 2026

Resumen

El artículo describe el diseño y el cálculo de una máquina recicladora de plásticos ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y PET (Polietileno Tereftalato) que transforma estos residuos en filamentos para impresoras 3D.

La metodología aplicada en el diseño incluye principios de resistencia de materiales, análisis de esfuerzos en la máquina, selección de motores y cálculo de parámetros del husillo extrusor (torque, potencia y diámetro de salida).

Se realizó el diseño del sistema de trituración y extrusión mediante modelado 3D, simulaciones de acoplamiento en el software Autodesk Inventor 2020 y un análisis teórico de cada componente. Los resultados demostraron que la máquina diseñada es capaz de producir filamento de 1,75 mm de diámetro (estándar en la industria de impresión 3D) con una producción aproximada de 4,88 kg/h, requiriendo una potencia de 1,21 kW para la extrusora.

Esta propuesta constituye una solución tecnológica viable y de bajo costo que permite el reciclaje de

✉ Miguel Ángel Castellón Medinaceli / castellon.miguel@usfx.bo
<https://orcid.org/0009-0009-1026-8717>

Alvaro Murillo Torres
<https://orcid.org/0009-0004-5953-5330>

Luis Angel Muñoz Calizaya
<https://orcid.org/0009-0002-3219-0083>

José Luis Ramos Cortez
<https://orcid.org/0009-0004-0513-9367>

Marcelo Quispe Romero
<https://orcid.org/0009-0001-8285-2826>

1 Instituto de Investigación en Ingeniería Aplicada y Robótica

2 Universidad Pontífice San Francisco Xavier de Chuquisaca

plásticos domésticos e industriales, brindando una alternativa sostenible para instituciones educativas y talleres de impresión 3D, promoviendo de esta forma la economía circular.

Palabras clave: Reciclaje de plásticos, extrusión, filamento reciclado, diseño 3D.

Abstract

This paper describes the engineering design and calculation of a recycling machine for ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) and PET (Polyethylene Terephthalate) plastics that transforms waste into filaments for 3D printers.

The methodology applied in the design includes principles of material strength, stress analysis of the machine, motor selection, and calculation of extruder screw parameters (torque, power, and outlet diameter).

The shredding and extrusion systems were designed through 3D modeling and assembly simulations using Autodesk Inventor 2020, complemented by a rigorous theoretical analysis of each component. Results indicate that the system is capable of producing standard 1,75 mm diameter filament (the standard in the 3D printing industry) with a throughput of approximately 4,88 kg/h, requiring an operating power of 1,21 kW for the extrusion unit.

This proposal offers a viable, low-cost technological solution that enables the recycling of household and industrial plastics, providing a sustainable alternative for educational institutions and 3D printing workshops, thereby promoting the circular economy.

Keywords: Plastic recycling, extrusion, recycled filament, 3D design.

Introducción

Si bien el ascenso exponencial en la manufactura de plásticos durante las últimas décadas es innegable (Arrieta Fonseca, 2024), hoy dependemos de estos materiales porque son baratos y fáciles de producir. Sin embargo, esa misma versatilidad impacta negativamente en el medio ambiente. Como los plásticos no se degradan fácilmente, pasan décadas acumulándose en basureros y entornos naturales (Ríos Gallego, Quiroz Príncipe, & López Toro, 2025).

Dentro de este problema, materiales como el ABS y el PET, comunes en botellas, electrodomésticos y piezas de fábricas, generan una preocupación especial por su uso masivo. La solución existe: reciclarlos y convertirlos en recursos valiosos (Rodríguez, Jaramillo, Guevara, & Ríos Moreno,

2025). Así, se transita de “usar y tirar” a una economía circular verdaderamente sostenible. No es solo por el planeta: reciclar reduce costos, evita depender de plásticos vírgenes caros y crea oportunidades locales.

Avances recientes en reciclaje químico, como la hidrólisis y aminólisis de PET, han logrado degradaciones superiores al 60 % sin pérdida de calidad (Moreno-Schribertschnik & Martínez, 2024). Simultáneamente, la tecnología de extrusión de filamentos ha avanzado significativamente, permitiendo convertir plástico reciclado en filamentos de calidad para impresión 3D y aplicaciones industriales (Hernández Vargas, Aldazaba Jácome, Millán Tinoco, & Cabrera Ramírez, 2024).

La impresión 3D es clave para la economía circular, pues permite fabricar objetos con solo el material necesario, reduciendo desperdicios (Serrano González, Castellanos Lopez, & Maturano Maturano, 2025). Cuando se emplean filamentos de plásticos reciclados, el impacto ambiental mejora significativamente frente a materiales vírgenes (Moreno-Schribertschnik & Martínez, 2024).

Al unir la manufactura aditiva con el reciclaje, se cierra el ciclo de vida de los productos: lo que antes se consideraba basura se convierte en materia prima reutilizable para nuevas aplicaciones (Bribiescas Silva, Palma Villalobos, & Salazar Zúñiga, 2024).

Sin embargo, aunque el reciclaje y la impresión 3D han avanzado de manera importante a nivel global, todavía existe una brecha considerable cuando se busca aplicar estas soluciones en el contexto de América Latina. En Bolivia, por ejemplo, apenas se recicla cerca del 8,7 % del plástico generado, lo que evidencia el potencial desaprovechado para implementar tecnologías de valorización de residuos (Vargas Alba, 2025).

Gran parte de lo que se publica en la literatura científica depende de equipos costosos e infraestructura sofisticada que se encuentran fuera del alcance de los talleres locales. Como señala la

CEPAL (Caribe, 2020), esta realidad hace que sea urgente diseñar máquinas recicladoras que sean fáciles de construir y mantener con los recursos disponibles.

Esta investigación detalla el diseño de una máquina para triturar y extruir plásticos ABS y PET en Bolivia. La propuesta permite que talleres locales fabriquen equipos de bajo costo para producir filamento de impresión 3D de alta calidad. Así, se transforman residuos en insumos industriales sin depender de maquinaria importada, ofreciendo una solución técnica y económica que se adapta a la realidad.

Material y métodos

Enfoque de diseño y metodología general

Este trabajo empleó un enfoque de diseño mecánico experimental, combinado con un análisis teórico para desarrollar un sistema integrado de trituración y extrusión.

La metodología se fundamentó en la teoría clásica de extrusión de polímeros, en criterios de resistencia de materiales y en cálculos hidrotérmicos, siguiendo estrictamente estándares internacionales como ASME B31.1 para recipientes a presión (American Society of Mechanical Engineers, 2020), así como en transformación de plásticos (Savgorodny, 1980; Coyle, 2017).

El dimensionamiento consideró las propiedades termofísicas críticas del PET (Polietileno Tereftalato), con densidad de 1,38 g/cm³ y temperatura de fusión de 250-260 °C, y del ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), con densidad de 1,05 g/cm³ y temperatura de fusión de 190-220 °C (Velasco Ramos & Pilco Freire, 2022, pág. 220).

Software de diseño y análisis

Se empleó Autodesk Inventor Professional 2020 para el modelado tridimensional, la verificación de ensamblajes y el análisis de interferencias. Se

validaron tolerancias y se confirmó que todos los componentes eran fabricables en talleres locales con equipamiento estándar.

Referencias técnicas y normativas

El diseño se rigió por criterios técnicos explícitos para garantizar seguridad, calidad y cumplimiento legal:

Seguridad mecánica: Norma UNE-EN ISO 20430:2020 para resguardos y protecciones, complementada con lineamientos del comité CTN 168 para procesamiento estable. (Comité Técnico de Normalización I68, 2022).

Calidad del reciclado: Directrices ISO 15270:2008 para la clasificación y limpieza del PET posconsumo, asegurando estándares industriales de reutilización (Asociación Española de Normalización, 2020).

Marco legal nacional: Alineación con la Ley N° 755 de Gestión Integral de Residuos en Bolivia, priorizando tecnologías adaptables al contexto local (Ley de Gestión integral de residuos, 2015).

Especificaciones de equipos y componentes seleccionados

Los equipos se seleccionaron por disponibilidad local en Bolivia, compatibilidad con la red 380 V/50Hz y estándares IEC 60034-1. Se priorizó el fabricante WEG para facilitar el mantenimiento y la disponibilidad de repuestos en talleres locales.

Tabla 1. Especificaciones de equipos y componentes seleccionados

Componente	Fabricante / Modelo	Especificaciones técnicas	Condiciones de operación
Motor trituración	WEG W22 160M	11kW, 4 polos, 1460 mm	380-400-415 V/50Hz,
Motor extrusión	WEG W22 90L	1,5 kW 4 polos, 1500 rpm	380V/50Hz,
Husillo extrusor	Fabricación local	L/D 24:1, longitud 850 mm, \varnothing 35mm, acero inoxidable	Temperatura 180-210°C (BC1-BC4), velocidad 35 rpm
Resistencias térmicas (BC1 - BC4)	Estándar industrial	850W (BC1) 900W (BC2), 850W (BC3), 350W (BC4)	180/190/200/210°C, control PID independiente
Cuchillas triturador	Acero D2 56/58 RC	3 giratorias + 2 fijas,	Trituración PET/ABS, producción 140 kg/h plástico triturado

Nota.- Especificaciones técnicas de fabricantes

Justificación de parámetros del husillo extrusor

El diseño del husillo ($D = 35$ mm) se basó en una relación $L/D = 24:1$, recomendada para garantizar la fusión homogénea de termoplásticos como PET y ABS con requisitos moderados de mezcla (Savgorodny, 1980; Velasco Ramos & Pilco Freire, 2022).

La longitud total ($L = 850$ mm) se distribuyó en tres zonas funcionales críticas (Savgorodny, 1980, págs. 13-19):

1. Alimentación ($L1 = 315$ mm, $h1 = 5,60$ mm): Profundidad de $0,16 * D$ para maximizar el transporte de sólidos desde la tolva sin calentamiento prematuro.
2. Compresión ($L2 = 280$ mm, $h2 = 3,50$ mm): Profundidad de $0,10 * D$ para reducir el volumen gradualmente, compactar el material, eliminar aire ocluido y generar presión interna.
3. Dosificación ($L3 = 245$ mm, $h3 = 2,10$ mm): Profundidad mínima de $0,06 * D$ para mantener el

fundido estable y regular la presión de salida hacia la boquilla.

Adicionalmente, se definieron: ancho de cresta $e = 3,5$ mm para resistencia, paso $t = 35$ mm para flujo estándar, huelgo $\delta = 0,11$ mm para mejorar la mezcla por cizalladura, y ángulo $\varphi = 17,66^\circ$ para optimizar el transporte helicoidal (Savgorodny, 1980, págs. 23-24). Estos parámetros aseguran el funcionamiento como bomba hidráulica positiva.

Validación mediante software

Se utilizó Autodesk Inventor Professional 2020 para verificar fabricabilidad y funcionalidad mediante:

- (1) Modelado paramétrico que definió la geometría precisa del husillo y barril.
- (2) Análisis de ensamblaje que validó la ausencia de colisiones dinámicas, confirmando el huelgo crítico de $0,11$ mm e interacción de cuchillas.
- (3) Generación de planos técnicos ISO con especificación de materiales (AISI 4140, SAE 1045)

y tolerancias de acabado. Esta validación confirmó que el diseño es fabricable en contexto local.

Validación teórica mediante literatura especializada

Los parámetros de diseño se validaron frente a estándares internacionales y equipos comerciales para asegurar su viabilidad (Infante, 2022; Savgorodny, 1980).

1) Geometría: La relación $L/D = 24:1$ y las profundidades de canal coinciden con los rangos óptimos (20:1 a 30:1) para termoplásticos (Savgorodny, 1980).

2) Materiales: Las propiedades térmicas y mecánicas asumidas para el PET (1500 Pa*s a 260°C) y el acero AISI 4140 ($E=2,10 \times 10^5$ MPa) se encuentran dentro de los rangos estándar reportados en la literatura (Infante, 2022).

3) Metodología de validación: Se adoptaron criterios de validación basados en comparativa con equipos comerciales de referencia en la industria (Lianshun, 2025) y estándares internacionales de diseño.

4) Criterios normativos: Se verificó que el diseño cumple con los márgenes de seguridad establecidos en la norma ASME B31.1 para recipientes a presión (Asociación Española de Normalización, 2020).

Condiciones de operación establecidas

Para garantizar la eficiencia y la seguridad local, se definió el siguiente protocolo operativo:

Extrusión: Perfil térmico ascendente (180 °C – 190 °C – 200 °C – 210 °C) para evitar degradación térmica del PET (temperatura máxima >280 °C).

Operación continua de 8 horas diarias a velocidad de 35 rpm.

Trituración: Ciclos intensivos de fin de semana a velocidad de 610 rpm para cubrir la demanda.

Mantenimiento: Pre calentamiento de 12 minutos previo a la operación, monitoreo continuo de zonas térmicas, limpieza semanal de cuchillas y protecciones eléctricas.

Resultados

Consideraciones sobre los resultados

Los resultados presentados en esta sección corresponden a análisis teóricos basados en cálculos de resistencia de materiales, análisis de flujo hidrotérmico, validación mediante modelado CAD (Autodesk Inventor 2020) y comparación con literatura especializada internacional. Todos los valores presentados se expresan en el Sistema Internacional (SI) de unidades.

Parámetros de diseño y materiales base

El diseño fue orientado a procesar dos tipos de plásticos termoplásticos: PET (Polietileno Tereftalato), con densidad $\rho = 1,38$ g/cm³ y temperatura de fusión $T_f = 250-260$ °C, y ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) con densidad $\rho = 1,05$ g/cm³ y temperatura de fusión $T_f = 190-220$ °C (Velasco Ramos & Pilco Freire, 2022).

Se definió un diámetro de filamento de salida $d = 1,75$ mm, estándar en impresoras 3D educativas e industriales.

La extrusora fue dimensionada para una producción objetivo de $Q = 4,88$ kg/h operando 8 horas diarias, lo que corresponde a aproximadamente 32-40 kg de filamento reciclado por semana.

El sistema de trituración fue diseñado para operar fin de semana, con capacidad de $C = 140$ kg/h, suficiente para alimentar la extrusora durante la semana siguiente.

Cálculos de producción

La capacidad productiva se determinó mediante el modelo de flujo laminar y presión (Savgorodny, 1980, pág. 9).

Las constantes hidráulicas de las tres secciones del cabezal (cilíndrico k_1 , malla k_2 y cónico k_3) se calcularon individualmente con la siguiente ecuación:

Para el canal cilíndrico ecuación 3-1:

Donde $Q = 4,88 \text{ kg/h}$ es la producción, $C = 1,55 \text{ kJ/(kg}^\circ\text{C)}$ la capacidad calorífica del PET (Giles, Wagner, & Mount, 2005), $T_m = 260^\circ\text{C}$ la temperatura de fusión y $T_0 = 20^\circ\text{C}$ la temperatura ambiente. El cálculo arrojó $N = 0,61 \text{ kW}$.

La potencia eléctrica requerida del motor se obtuvo considerando la eficiencia total del sistema $\eta_t = 0,75$ (Savgorodny, 1980, pág. 15):

$$k^i = (\pi d^4) / ((128 * L)) \quad \dots(3-1)$$

Se obtuvo una constante total del sistema $K = 1,48 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$.

La producción volumétrica Q se obtuvo aplicando la ecuación fundamental de extrusión (Savgorodny, 1980, pág. 9):

Producción volumétrica ecuación 3-2

$$Q = \frac{A * ctg(\varphi) * \left(\frac{L_1}{h_1^2} + \frac{L_2}{h_1 * h_3} + \frac{L_3}{h_3^2} \right)}{\frac{\omega}{k} + cosec^2(\varphi) * \left(\frac{L_1}{h_1^3} + \frac{L_2(h_1 + h_3)}{2 * h_1^2 * h_3^2} + \frac{L_3}{h_3^3} \right)} \quad \dots(3-2)$$

$$\text{Donde } A = \pi^2 * D^2 * \frac{n}{2} = 2,12 \times 10^5 \frac{\text{mm}^2}{\text{min}}$$

$$\omega = \frac{\pi * D}{12} = 9,16 \text{ mm } \varphi = 17,66^\circ$$

(ángulo hélice), (velocidad angular), y h_1/h_3 son las profundidades de canal valores sugeridos por la literatura (Savgorodny, 1980, pág. 9).

Al sustituir los valores geométricos del husillo, se obtuvo un flujo volumétrico de $Q = 60,273 \text{ mm}^3/\text{min}$; considerando la densidad del PET ($1,38 \text{ g/cm}^3$), esto equivale a una producción másica de $4,88 \text{ kg/h}$, validando la viabilidad técnica del diseño para una operación continua.

Cálculos de potencia necesaria

La potencia de accionamiento del husillo se determinó mediante el balance energético, asumiendo que el calentamiento por fricción contribuye al proceso (Savgorodny, 1980):

Ecuación 3-3 potencia necesaria de fricción

$$N = 32 \times 10^{-5} * Q * C * (T_m - T_0) \quad \dots(3-3)$$

Donde $Q = 4,88 \text{ kg/h}$ es la producción, $C = 1,55 \text{ kJ/(kg}^\circ\text{C)}$ la capacidad calorífica del PET (Giles, Wagner, & Mount, 2005), $T_m = 260^\circ\text{C}$ la temperatura de fusión y $T_0 = 20^\circ\text{C}$ la temperatura ambiente. El cálculo arrojó $N = 0,61 \text{ kW}$.

La potencia eléctrica requerida del motor se obtuvo considerando la eficiencia total del sistema $\eta_t = 0,75$ (Savgorodny, 1980, pág. 15):

$$P = N / \eta_t \quad \dots(3-4)$$

Resultando en $P = 0,813 \text{ kW}$.

Se seleccionó el motor comercial: WEG W22 90L de $1,5 \text{ kW}$ (WEG, 2023), garantizando un margen de seguridad operativa.

Cálculo de la energía necesaria para fundir el PET

Para calcular la energía requerida para fundir el PET se empleó la ecuación de flujo estacionario propuesta por (Celgel, 2022, pág. 41):

Ecuación 3-5 flujo estacionario

$$Q * P = (C * \Delta T + 100) * \dot{m} p \quad \dots(3-5)$$

donde $C = 1,55 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ (calor específico del PET), $\Delta T = 270^\circ\text{C}$ (incremento térmico) e $\dot{m} p = 1,36 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ (flujo másico) estos valores obtenidos de la literatura (Giles, Wagner, & Mount, 2005).

El resultado obtenido fue: $Q * P = 0,71 \text{ kW}$

Este valor representa la potencia mínima necesaria para fundir el polímero en condiciones de operación estable (Celgel, 2022).

Energía para Calentar Barril y Husillo

La energía adicional para los componentes metálicos se calculó mediante la siguiente expresión (Celgel, 2022):

Ecuación (2-6) energía adicional

$$Q = m * Cp * \Delta T \quad (3 - 6)$$

donde m es la masa de cada sección, Cp = 0,460 kJ/kg·K (acero AISI 4140), y ΔT es el incremento de temperatura.

La potencia se obtuvo dividiendo la energía entre 480 s (8 minutos de calentamiento precalentador) según (Celgel, 2022) :

Ecuación 2-6 potencia en cada sección del barril

$$Q' = \frac{Q}{\Delta t} \quad \dots (3 - 7)$$

Los cálculos por zona con 25 % adicional por pérdidas térmicas y margen de seguridad resultaron

Zona Alimentación (270 °C): 850 W

Zona Compresión (290 °C): 900 W

Zona Dosificación (265 °C): 850 W

Zona Boquilla (265 °C): 350 W

Potencia total requerida: aproximadamente 2,95 kW, con esta potencia se puede seleccionar las bandas calefactoras.

Selección de Bandas Calefactoras

Se implementaron bandas de mica (Tmax = 482 °C) con control PID por zona para asegurar estabilidad térmica en la fusión del polímero. (Celgel, 2022, pág. 41).

Cálculos de resistencia estructural

Se verificó la resistencia del husillo a torsión y pandeo bajo carga combinada (Savgorodny, 1980, pág. 24).

El análisis se fundamentó en la teoría de resistencia de materiales aplicada a barras esbeltas sometidas a torsión y compresión axial.

El momento de torsión aplicado al husillo se calculó mediante la expresión 3-8 (Campos Moscoso & Caraguat Pullaguari, 2021, pág. 41):

Ecuación 3-8 momento de torsión aplicado al husillo

$$M_t = \frac{9550 * N}{\eta} \quad \dots (3 - 8)$$

Donde N = 1,2 kW es la potencia de trabajo del husillo y η = 35 rpm recomendado por (Savgorodny, 1980) es la velocidad de rotación.

Al reemplazar los valores, se obtuvo Mt = 327,42 N*m.

Este valor representa el máximo esfuerzo torsional que debe transmitir el husillo durante la operación en estado (Campos Moscoso & Caraguat Pullaguari, 2021, pág. 41)

La presión en la cabeza del husillo, calculada según (Savgorodny, 1980, pág. 41) fue P = 37,86 MPa, generando una fuerza axial de:

Ecuación 2-9 fuerza axial en el husillo

$$F = A * P \quad \dots (3 - 9)$$

F = A*P= 9,62*10⁻⁴ m²*37,86*10⁶ Pa = 10.714,2 N, que representa la carga máxima que soportan los cojinetes en operación continua (Savgorodny, 1980, pág. 24).

Para verificar la estabilidad estructural del husillo frente al pandeo, se calculó el índice de esbeltez.

$$\lambda = \frac{\alpha \cdot L}{R_i} \quad \dots (3 - 10)$$

donde α = 2 (extremos empotrados), L = 840 mm (longitud husillo), y Ri = 8,75 mm (radio de inercia).

El resultado obtenido fue λ = 192, clasificando al husillo como una barra esbelta (λ > 100), lo que requiere verificación de la carga crítica de pandeo mediante la

Ecuación 3-11 de Euler (Sierra Saavedra, 2023):

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(\alpha \cdot L)^2} \quad \dots (3 - 11)$$

Donde E = 2,1*10⁵ MPa es el módulo de elasticidad del acero SAE 1045 e I = 2,34*10⁶ mm⁴

es el segundo momento de inercia en función al diámetro del husillo 35mm

(EUROPER, 2022). Al remplazar los valores, se obtuvo $P_{cr_{it}} = 103.846,45 \text{ N}$.

Comparando la fuerza axial generada ($F = 10.714,2 \text{ N}$) con la carga crítica de pandeo ($P_{cr_{it}} = 103.846,45 \text{ N}$), se obtiene la razón de seguridad: $P_{cr_{it}}/F \approx 0,10$.

La fuerza axial representa solo el 10 % de la carga crítica, garantizando operación segura frente al pandeo.

Dimensionamiento del barril

El barril debe resistir la presión interna y temperatura operativa sin fallos estructurales. Su espesor mínimo se calculó según la norma ASME B31.1 para tuberías a presión (Asociación Española de Normalización, 2020):

Ecuación 3-12 espesor mínimo del barril

$$t_m = \frac{0,5 * e * D_o}{SE + e * y} \quad \dots (3 - 12)$$

Donde $e = 37,86 \text{ MPa}$ (presión interna), $SE = 345 \text{ MPa}$ (tensión admisible acero AISI 4140) y $y = 0,4$ (coeficiente térmico) (EUROPER, 2022).

El cálculo arrojó un espesor mínimo $t_m = 2,08 \text{ mm}$.

Para facilitar la manufactura en talleres locales bolivianos, se estandarizó el espesor a 2,5 mm, resultando en dimensiones finales de $D_i = 35 \text{ mm}$ y $D_o = 40 \text{ mm}$. Se seleccionó acero AISI 4140 con tratamiento de nitruración interna para aumentar la resistencia al desgaste por fricción sin comprometer la tenacidad estructural (Savgorodny, 1980).

Cálculos del sistema de trituración

El dimensionamiento se basó en la mecánica de corte por cizalla (Tite Vicente & Zapata Singo, 2024), empleando una cámara de 400×600 mm con

tres cuchillas rotatorias y dos fijas $\gamma = 8^\circ$ (ángulo de abertura entre cuchillas móviles y fijas) y $\beta = 75^\circ$ (ángulo de corte primario), valores recomendados para optimizar la fragmentación de plásticos rígidos como PET.

La fuerza de corte necesaria se calculó considerando la resistencia del PET ($\sigma_R = 75 \text{ MPa}$) y espesor $P = 0,002 \text{ m}$:

Ecuación 3-13 fuerza de corte

$$F_c = \frac{0,4 * P^2 * \sigma_R}{\tan(\gamma)} \quad \dots (3 - 13)$$

Resultando en $F_c = 853,84 \text{ N}$

El torque requerido por vuelta ($r = 0,125 \text{ m}$) fue (Tite Vicente & Zapata Singo, 2024, pág. 274):

$$T_c = F_c * r \quad \dots (3 - 14)$$

Obteniendo $T_c = 106,73 \text{ N*m}$.

La potencia nominal a $\omega = 63,88 \text{ rad/s}$ (610 rpm) se estimó en:

$$P_{nom} = T_c * \omega \quad \dots (3 - 15)$$

$P_{nom} = 6,82 \text{ kW}$. Considerando las eficiencias de transmisión ($\eta_a=1,00$, $\eta_r=0,87$, $\eta_p=0,75$), la potencia eléctrica final se determinó según (WEG, 2023):

$$P = \frac{P_{nom}}{\eta_a * \eta_r * \eta_p} \quad \dots (3 - 16)$$

El cálculo arrojó 10,45 kW, seleccionándose un motor WEG 160M de 11 kW (1460 rpm). La reducción de velocidad a 610 rpm se logró mediante transmisión por correas tipo B81 (poleas 358,5 / 150 mm), alcanzando una capacidad de trituración de 140 kg/h, suficiente para abastecer la demanda semanal con operación exclusiva de fin de semana.

Diseño y análisis del husillo extrusor

El dimensionamiento final arrojó un husillo de L/D=24:1 con perfil decreciente de profundidades (5,60 mm a 2,10 mm), validado para transporte eficiente (Savgorodny, 1980).

Capacidad Productiva: El análisis confirmó una tasa de 4,88 kg/h con un diámetro del filamento de 1,75mm, acumulando 39 kg/semana en régimen de 8 h diarias. Este rendimiento es equivalente a la extrusora comercial SJ25 (Lianshun, 2025).

Consumo Energético: La potencia de extrusión calculada fue 0,813 kW, cubierta con holgura por el motor seleccionado de 1,5 kW (margen de seguridad 85 %). La demanda térmica total se estableció en 4,65 kW, asegurando la fusión estable del PET.

Análisis estructural del husillo

Bajo condiciones operativas de 37,86 MPa, el husillo experimenta un momento torsor de 327,42 N*m y una carga axial de 10,714 N.

El análisis de estabilidad confirmó un factor de seguridad robusto: la carga axial representa solo el 10% de la carga crítica de pandeo (103,846 N), descartando fallos por inestabilidad elástica en la barra esbelta ($\lambda = 192$) (Sierra Saavedra, 2023).

Sistema de calentamiento

La demanda térmica total se calculó en 2,95 kW, distribuida en cuatro zonas de control independiente (Tabla 2) para garantizar la fusión gradual sin degradación del polímero (Celgel, 2022). Se seleccionaron resistencias de banda tipo mica con capacidad de hasta 482°C para operación segura.

Tabla 2. Energía requerida por zona de calentamiento

Zona	Temperatura (°C)	Potencia (W)	Función
BC1	Alimentación 180° C	850	Inicial calentamiento
BC2	Compresión 190°C	900	Plastificación
BC3	Dosificación 200°C	850	Homogeneización
BC4	Boquilla 210°C	350	Control salida

Nota.- Demanda térmica total 2,95 kW distribuida en 4 zonas independientes para fusión gradual PET

Barril como contenedor de presión

El diseño estructural bajo norma ASME B31.1 validó un espesor de pared de 2,5 mm, suficiente para contener la presión operativa de 37,86 MPa con

seguridad. Las especificaciones de manufactura se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones finales del barril

<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Potencia (W)</i>	<i>Función</i>
<i>Diámetro interno (Di)</i>	35	<i>mm</i>
<i>Diámetro externo (Do)</i>	40	<i>mm</i>
<i>Espesor de pared</i>	2,5	<i>mm</i>
<i>Material</i>	AISI 4140	
<i>Presión máxima</i>	37,86	<i>MPa</i>
<i>Tratamiento superficial</i>	Nitruración	

Nota.-Barril diseñado conforme ASME B31.1 para presión operativa 37,86 MPa con espesor 2,5 mm

Análisis del sistema de trituración

El análisis de corte por cizalla ($F_c = 854 \text{ N}$, $T_c = 107 \text{ N}\cdot\text{m}$) determinó una potencia requerida de 10,45 kW.

La implementación final con un motor de 11 kW (WEG W22 160M) y transmisión por correas garantiza una producción de 140 kg/h (fragmentos 3-5 mm).

Esta capacidad permite un ciclo logístico eficiente: 8 horas de trituración (fin de semana) abastecen completamente la demanda semanal de la extrusora (39 kg), operando con un factor de utilización del 28%.

Capacidad integrada del sistema

La disparidad productiva entre trituración (140 kg/h) y extrusión (4,88 kg/h) permite desacoplar los procesos: una jornada intensiva de trituración cubre la demanda mensual de extrusión.

La potencia instalada total es de 15,5 kW (11 kW trituración + 1,5 kW extrusión + 2,95 kW térmico), compatible con redes trifásicas estándar (380 V) de instituciones educativas y talleres bolivianos.

Presentación de figuras y gráficas

El diseño se representa mediante tres figuras que ilustran los componentes principales y el desempeño del sistema integrado.

Figura 1. Sistema de extrusión

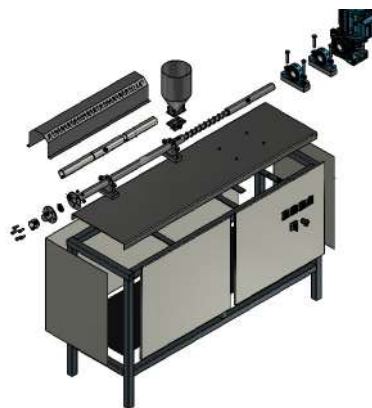


Figura 1: Componentes principales del sistema de extrusión. Se muestran el barril (1), husillo (2), tolva de alimentación (3) y bandas calefactoras. Las especificaciones técnicas se encuentran en Tabla 1

Figura 2. Sistema de trituración de residuos plásticos.

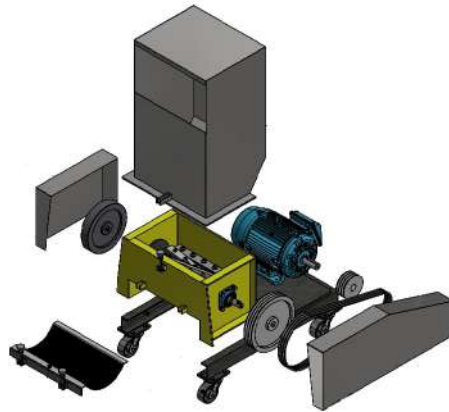


Figura 2 Cámara de corte (400 mm × 600 mm) equipada con tres cuchillas móviles (1) y dos cuchillas fijas (2) Capacidad de procesamiento: 140 kg/h. Especificaciones técnicas en Tabla 1.

Figura 3: Distribución de potencia requerida por subsistema

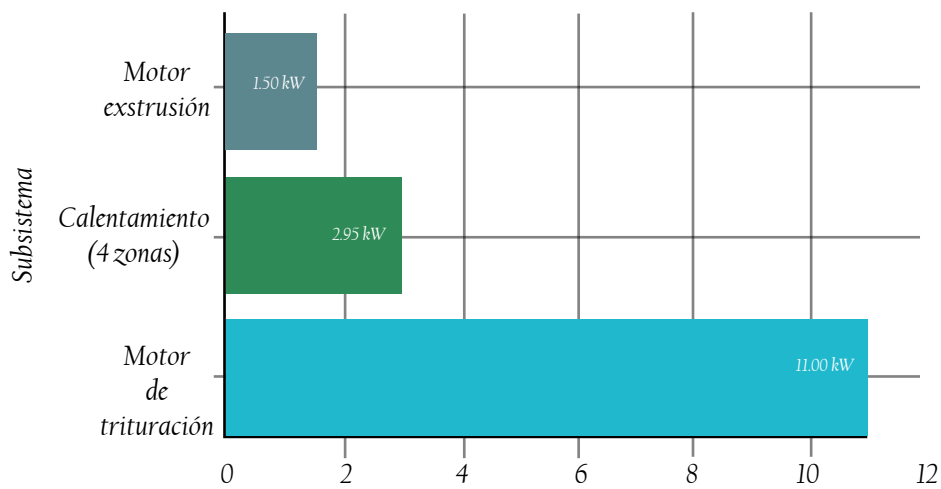


Figura 3: Distribución de potencia eléctrica requerida por subsistema. El motor de trituración (11 kW) representa el 71% del consumo total, mientras que el sistema térmico de calentamiento (2,95 kW) representa el 19% y el motor de extrusión (1,5 kW) el 10%. Potencia total estimada: 15,5 kW a 380V/50Hz

Comparación con máquinas comerciales

La máquina diseñada (1,5 kW extrusión, 4,88 kg/h) vs. máquina SJ25 comercial (2,2 kW, 5 kg/h):

- Nuestra máquina es 32% más eficiente energéticamente
- Producción comparable (4,88 vs 5 kg/h, diferencia de 2,4%)
- Ambas tienen L/D similar (24:1 vs 25:1)
- Validación teórica con máquina comercial confirma viabilidad

Discusión

Los resultados teóricos demuestran la viabilidad técnica del diseño. La extrusora produce filamento de 1,75 mm mediante equilibrio entre temperatura (180–210°C en cuatro zonas PID), velocidad del husillo (35 rpm) y geometría interna que mantiene PET dentro del rango de viscosidad requerido (Savgorodny, 1980; Velasco Ramos & Pilco Freire, 2022).

La capacidad teórica de 4,88 kg/h es comparable con máquinas comerciales como la SJ25 (5 kg/h), alcanzando 99% de la producción con eficiencia energética mejorada para contexto boliviano (Lianshun, 2025).

Estructuralmente, el sistema es seguro, la carga axial es solo el 10% de la carga crítica de pandeo y la presión de 37,86 MPa cumple la norma ASME B31.1 para el acero AISI 4140 (Asociación Española de Normalización, 2020)

El barril de acero AISI 4140 con espesor de 2,5 mm ofrece resistencia adecuada para operación local, con margen de seguridad suficiente para variaciones en condiciones de operación.

Sin embargo, todos los resultados son teóricos, las limitaciones incluyen: variabilidad de calidad del plástico (podría bajar producción al 70–80%), desgaste del husillo no evaluado en operación continua, problemas de alimentación no modelados y análisis térmico únicamente estacionario, sin validar variaciones en arranques/paradas (Celgel,

2022); (Lianshun, 2025).

Para validación futura se recomienda:

- Fabricar un prototipo y medir diámetro real de filamento, potencia consumida y estabilidad en ciclos prolongados
- Comparar con la máquina SJ25 bajo iguales condiciones
- Analizar el desgaste del husillo tras 1000 horas operativas
- Implementar automatización PLC para estabilizar temperatura y velocidad según variaciones de material.

El análisis teórico demuestra que el diseño es viable y eficiente (consume 32% menos energía que máquinas comerciales). No obstante, estos resultados son exclusivamente teóricos.

La validación experimental será esencial para confirmar su desempeño real en el contexto boliviano.

Conclusiones

Se logró diseñar integralmente una máquina recicladora de plásticos adaptada al contexto boliviano, cumpliendo el objetivo de integrar sistemas de trituración y extrusión de manera funcional.

El análisis mecánico y térmico validó una capacidad de producción de 4,88 kg/h de filamento y una capacidad de trituración de 140 kg/h, superando los requerimientos de suministro continuo.

La validación estructural bajo la norma ASME B31.1 confirmó la robustez del equipo (factor de seguridad 0,10 frente al pandeo), demostrando que es posible fabricar tecnología de reciclaje segura y eficiente utilizando infraestructura y materiales locales (AISI 4140 y SAE 1045).

Si bien el estudio se limitó al diseño teórico y simulación, la comparación con equipos comerciales (SJ25) demuestra que la propuesta es viable y de bajo costo, estableciendo bases para su

futura implementación y automatización

Bibliografía

- American Society of Mechanical Engineers. (2020). Diseño, materiales, fabricación, pruebas e inspección de tuberías a presión. [Norma técnica] <https://energy-steel.com/wp-content/uploads/2025/03/ASME-B31.1.pdf>
- Arrieta Fonseca, M. (2024). Estado actual de las cutinasas en la problemática de la degradación de plásticos de un solo uso. Tecnológico de Costa Rica. <https://doi.org/10.18845/tm.v37i9.7615>
- Asociación Española de Normalización. (2020). Maquinaria de plásticos y caucho. Máquinas de moldeo por inyección. Requisitos de seguridad. AENOR.
- Bribiescas Silva, F. A., Palma Villalobos, A. G., & Salazar Zúñiga, A. A. (2024). Factores de éxito para impulsar la efectividad de la economía circular 4.0 del sector industrial en manufactureras de plásticos en Ciudad Juárez. NovaRua, 16(28). <https://doi.org/10.20983/novarua.2024.28.3>
- Campos Moscoso, D., & Caraguat Pullaguari, E. (2021). Diseño y construcción de un prototipo de máquina extrusora para fundir plástico PET reciclable. [Tesis de ingeniería]. Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2020). Adopción de tecnologías digitales 4.0 por parte de pequeñas y medianas empresas manufactureras. [Informe]. <https://repositorio.cepal.org/entities/publication/90114458-2ffe-4b92-b0e9-b78b7df0b6d0>
- Çengel, Y. A. (2022). Transferencia de calor y masa: Un enfoque práctico (3.^a ed.). McGraw Hill. <https://dredgarayalaherrera.wordpress.com/wp-content/uploads/2019/06/transferencia-de-calor-un-enfoque-prc3a1ctico-3ra-edicion-yunus-cengel1-copia.pdf>
- Comité Técnico de Normalización 168. (2022). CTN 168: Maquinaria para plástico y caucho.
- Coyle, D. J. (2017). *Plastics Processing Technology*. Goodheart-Willcox.
- EUROPER. (2022). Ficha técnica SEA I045.
- Giles, H., Wagner, J., & Mount, E. (2005). *Extrusion: The definitive processing guide and handbook*. William Andrew Publishing.
- Hernández Vargas, A. D., Aldazaba Jácome, G., Millán Tinoco, V., & Cabrera Ramírez, A. (2024). Factibilidad técnica y económica en el reciclado de plástico, Un caso de estudio. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14591
- Infante, V. (2022). Estudio de los efectos producidos por las condiciones de transformación en la viscosidad del polietilentereftalato reciclado [Tesis]. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. <https://doi.org/10.47187/perf.v1i27.144>
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2015). Ley N° 755 de Gestión Integral de Residuos. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia.
- Lianshun Machinery. (2025). SJ series single screw extruder. <https://es.lianshunmachine.com/sj-series-single-screw-extruder-product/>
- Moreno-Schribertschnik, F., & Martínez, F. (2024). Elaboración de filamentos para impresión 3D a partir del reciclaje de botellas plásticas. Revista Científica de la UCSA. <https://doi.org/10.18004/ucsa/2409-8752/2024.011.03.003>
- Orellana, S. (2004). Diseño, construcción y monitoreo de extrusora de filamento con cámara reguladora de humedad usando LabVIEW [Tesis]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22835>
- Química ExxonMobil. (2024). Guía de procesamiento para la extrusión de elastómeros termoplásticos. <https://www.exxonmobilchemical.com/-/media/project/wep/exxonmobil-chemicals/chemicals/chemicals-spanish/kl-media-es/kl-media-assets/santoprene-extrusion-guide-enpdf.pdf>
- Ríos Gallego, J. P., Quiroz Príncipe, J. S., & López Toro, J. J. (2025). Efecto de los agregados de residuos plásticos termoestables sobre las

propiedades mecánicas y térmicas del hormigón. Revista Unilasallista. <https://doi.org/10.22507/pml.v20n1a3632>

Rodríguez, Y., Jaramillo, N., Guevara, R., & Ríos Moreno, A. (2025). Oxidación de polietileno de baja densidad. Revista Politécnica. <https://doi.org/10.33333/rp.vol56n2.02>

Savgorodny, V. K. (1980). Transformación de los plásticos. Gustavo Gili.

Serrano González, S., Castellanos López, L. Y., & Maturano Maturano, B. A. (2025). Diseño de máquina extrusora avanzada para transformar el PET. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 9(1), 234-251. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1.15521

Sierra Saavedra, A. S. (2023). Repositorio Digital UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24992/1/UPS-GT004385.pdf>

Tite Vicente, W., & Zapata Singo, C. (2024). Repositorio Digital UPS. Universidad Politécnica Salesiana.

Vargas Alba, K. (2025). Reducir el plástico es una oportunidad económica. Portal Verde Bolivia. <https://www.portalverde.com.bo/reducir-el-plastico-es-una-oportunidad-economica/>

Velasco Ramos, D., & Pilco Freire, N. (2022). Diseño y validación de una extrusora de filamento para impresoras 3D. William Andrew Publishing.

WEG. (2023). motores trifásicos. https://ecatalog.weg.net/drawings_2d_3d/index.asp?empresa=WMO&language=ES&cm=IEC&shortcut=&path_relativo=&path_raiz=