

Diseño de un sistema para la elaboración de filamento para prototipado 3D tipo FDM a partir de
residuos sólidos de PET reciclado

Juan Carlos Hernández Suárez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Diseñador Industrial

Director

MSc. Luis Alberto Laguado Villamizar

Magister en Ingeniería de Materiales

Codirector

PhD. John Faber Archila Díaz

Doctor en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Diseño Industrial

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A mis papás. Sin su apoyo, y sin todos los sacrificios que han hecho para formarme como persona y nada de esto habría sido posible.

Agradecimientos

A mis papás por su apoyo incondicional. A mi director y codirector por guiarme, corregirme, y ayudarme a pulir este proyecto. A la Universidad Industrial de Santander por haberme acogido en esta carrera, y proporcionarme tantas oportunidades a lo largo de mi formación educativa. A todos los profesores que ayudaron a formarme durante todos estos años. A todos los compañeros que estuvieron junto a mí y me proporcionaron su apoyo cuando lo necesité.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Identificación del proyecto	20
1.1 Objetivos	20
1.1.1 Objetivo General	20
1.1.2 Objetivos Específicos	20
2. Marco teórico	21
2.1 Economía circular	21
2.2 Prototipado 3D o manufactura aditiva	22
2.3 Polietileno Tereftalato	23
2.4 Procesos para la manufactura de filamento polimérico	24
2.5 Antecedentes de la situación de estudio	28
3. Proceso de diseño	31
3.1 Identificación de requerimientos de diseño	31
3.1.1 Requerimientos derivados de las propiedades del PET	31
3.1.2 Benchmarking	31
3.1.3 Indagación con usuarios líderes	35
3.1.4 Consideraciones de seguridad	37
3.1.5 Método KANO	37
3.1.6 Tabla PRS	41
3.2 Ideación	43
3.3 Selección de ideas	56
3.3.1 Cálculos de potencia para determinar la viabilidad del uso de motor, manivela, pedales, o pedaleras de mano	56
3.3.2 Comparación por matriz de Pugh	59
3.4. Diseño de detalle	65
3.4.1 Diseño de las etapas de triturado y extrusión	65
3.4.2 Diseño de la etapa de control electrónico	72
3.5. Lista de Materiales	74
4.1. Construcción del modelo	77
4.2. Pruebas de verificación	79
4.3. Reporte y análisis de pruebas de verificación	81
4.4. Cambios de diseño basados en los resultados de las pruebas	89
4.5. Pruebas subsecuentes	91
4.6 Rediseño de la boquilla	94

RECICLAJE DEL PET COMO FILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D	5
5. Conclusiones	96
6. Recomendaciones	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

	Pág.
Tabla 1. Comparación de características del PLA, ABS y PET	24
Tabla 2. Frecuencia de respuestas al cuestionario de aplicación del método KANO	41
Tabla 3. Product Requirement Specifications	42
Tabla 4. Alternativas de diseño del dispositivo	59
Tabla 5. Resultados de matriz de Pugh	65
Tabla 6. Lista de materiales	74
Tabla 7. Resultados de la prueba de eficiencia del triturado	83
Tabla 8. Resultados de la prueba de extrusión	86
Tabla 9. Resultados de las pruebas de extrusión con tensor	91

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Extrusora de filamento con tornillo de Arquímedes	25
Figura 2: Tipos de molinos trituradores	26
Figura 3: Diagrama FAST de funciones del dispositivo	44
Figura 4: Alternativa 1 de entrada de material	45
Figura 5: Alternativa 2 de entrada de material	46
Figura 6: Alternativa 1 de fuente de movimiento para el sistema de reducción del material. Utilizar el mismo motor que el sistema de extrusión.	47
Figura 7: Alternativa 2 de fuente de movimiento para el sistema de reducción del material. Operado mediante manivela.	48
Figura 8: Alternativa 3 de fuente de movimiento para el sistema de reducción del material. Operado por pedales de mano.	49
Figura 9: Alternativa 4 de fuente de movimiento para sistema de reducción de material. Sistema acoplable a bicicleta.	50
Figura 10: Alternativa 1 de sistema de reducción	51
Figura 11: Alternativa 2 del sistema de reducción	52
Figura 12: Boceto del sistema de extrusión, alternativa 1	53
Figura 13: Boceto del sistema de extrusión, alternativa 2	54
Figura 14: Sistema de enfriamiento del filamento	55
Figura 15: Diagrama de bloques de la alternativa elegida	65
Figura 16: Render del diseño CAD del sistema	66

RECICLAJE DEL PET COMO FILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D	8
Figura 17: Detalle de las cuchillas de triturado y la boquilla de extrusión	67
Figura 18: Detalle de la rejilla de tamizaje del material	67
Figura 19: Detalle de la taza de recolección del material triturado	68
Figura 20: Vista de sección del tambor de extrusión	68
Figura 21: Vista explosionada del sistema de trituración	69
Figura 22: Vista explosionada del sistema de extrusión	71
Figura 23: Esquema del control electrónico de la extrusora	73
Figura 24: Módulo de triturado	77
Figura 25: Detalle de las cuchillas	77
Figura 26: Módulo de extrusión	78
Figura 27: Montaje del sistema con electrónica	78
Figura 28: Pesado del material inicial en muestra de ABS	81
Figura 29: Pesado del material que no pasó el tamizado en muestra de ABS	82
Figura 30: Comparación del material que pasó y que no pasó el tamizado en la anterior muestra de ABS	82
Figura 31: Desgaste del engranaje pequeño	84
Figura 32: Muestras de filamento de PET obtenido	85
Figura 33: Filamento en proceso de extrusión	85
Figura 34: Comparación de muestras de filamento de PET obtenidas contra filamento comercial	87
Figura 35 Comparación muestra de filamento de ABS obtenida contra filamento comercial	87
Figura 36: Muestra de pellets de PET antes y después del proceso de grageado	89

RECICLAJE DEL PET COMO FILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D	9
Figura 37: Sistema de reducción de velocidad reparado	90
Figura 38: Mejora del área de enfriamiento	90
Figura 39: Adición de un puller para aplicar tensión constante al filamento	91
Figura 40: Comparación de muestras de filamento obtenidas	92
Figura 41: Primera prueba de prototipado 3D con PET reciclado	93
Figura 42: Segunda prueba de prototipado 3D con PET reciclado	93

Lista de Apéndices

Apéndice A: Planos del dispositivo

Apéndice B: Modo de uso

Apéndice C: Simulaciones mediante software CAE

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

Resumen

Título: Diseño de un sistema para la elaboración de filamento para prototipado 3D tipo FDM a partir de residuos sólidos de PET reciclado¹

Autor: Juan Carlos Hernández Suárez²

Palabras Clave: Impresión 3D, PET, prototipado, reciclaje, termoplástico

Descripción: El ciclo de vida de los desechos de productos poliméricos, particularmente los denominados plásticos de un solo uso, es causa de creciente preocupación ambiental. Bajo el enfoque de la economía circular es posible cerrar el bucle del ciclo de vida de un alto porcentaje de estos productos. Sin embargo, en Colombia la mayoría de los desechos sólidos termina en rellenos sanitarios, lo cual contribuye a una creciente crisis ambiental. Uno de los materiales que se está desperdiciando por la falta de circularidad en nuestra economía es el PET, un termoplástico comúnmente usado en la fabricación de objetos de un solo uso como botellas y envases. La industria del prototipado 3D es un sector tecnológico que se encuentra creciendo rápidamente tanto en Colombia como en el resto del mundo. Aunque superficialmente esto implica un mayor consumo de polímeros termoplásticos, también implica una oportunidad para aumentar la circularidad de los desechos poliméricos que se producen actualmente si se logra incentivar la producción personal de filamento para impresión 3D reciclado. En el presente trabajo se propone el desarrollo de un sistema integrado para la elaboración de filamento reciclado para prototipado 3D a partir de desechos sólidos de PET.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Diseño Industrial. Director Luis Alberto Laguado Villamizar. Codirector John Faber Archila Díaz.

Abstract

Title: Design of a system for the manufacture of FDM 3D printing filament from the recycling of solid PET waste³

Author: Juan Carlos Hernández Suárez⁴

Key Words: 3D printing, PET, prototyping, thermoplastic, recycling

Description: The life cycle of thermoplastic polymeric waste materials, particularly single-use plastics, is cause for growing environmental concerns. Through the lens of circular economy it's possible to close the loop on the life cycle of a high percentage of these products. However, in Colombia most of these waste materials end up in landfills, which is shaping up to become an environmental crisis. One of these materials that aren't being taken advantage of because of a lack of circularity in our economy is PET, a thermoplastic commonly used for the production of single-use objects like bottles. The 3D printing industry is a technologixal sector that's experiencing rapid growth both in Colombia and in the world. While on a surface level this represents an increase in consumption of thermoplastic polymers, it also implies an opportunity to increase the circularity of the polymeric waste currently being produced if it's possible to incentivate personal production of recycled 3D printing filament. This work proposes the developement of a system for the production of 3D printing filament from solid PET waste.

³ Bachelor Thesis

⁴ Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Diseño Industrial. Director Luis Alberto Laguado Villamizar. Codirector John Faber Archila Díaz.

Introducción

Según el Departamento Nacional de Planeación, si el consumo de los colombianos se mantiene al ritmo actual, la generación de residuos sólidos en el país crecerá en un 20% en los próximos 10 años [1]. Considerando que en la actualidad solo el 17% de los residuos sólidos producidos en el país es reciclado (de un 40% que es reciclable) [1], y que 22% de los rellenos sanitarios del país se encuentran sobresaturados [2], esto supone un grave problema.

Gran parte del 83% de los residuos que está siendo desaprovechado consiste en artículos desechables de origen polimérico, tales como bolsas, pitillos y botellas de PET. Siendo un material altamente reciclable y ampliamente utilizado a nivel tanto nacional como mundial [3], el PET (Polietileno tereftalato) es un material con un alto potencial para la implementación de un modelo de economía circular; la cual es una estrategia económica que busca reducir tanto la entrada de materiales vírgenes como la salida de residuos de un sistema productivo mediante el reciclaje y reutilización de residuos.

Uno de los principales usos del PET es la producción de envases, representando cerca del 30% de la demanda de este material a nivel mundial [3]. Aunque no es el polímero más producido a nivel mundial, la prevalencia de su uso en productos desechables lo comparte en una parte significativa de los desechos de origen polimérico. Ya que el uso de plásticos reciclados en contacto con alimentos debe cumplir con estrictas restricciones y estándares por motivos de seguridad alimentaria [4], el uso de PET reciclado para la producción de envases puede resultar poco rentable comparado con el uso de PET virgen. Esta poca viabilidad para la reincorporación de los residuos de productos de PET como materia prima para el proceso productivo del que provienen contribuye parcialmente a su poco aprovechamiento.

Por lo tanto, si se quiere incorporar los residuos de PET como materia prima en nuevos procesos productivos, debe buscarse un campo de aplicación donde su reciclaje resulte más rentable que en la industria alimentaria. Un campo tecnológico que da especial importancia a los polímeros como el PET es el de el prototipado 3D tipo FDM (Fused Deposition Modelling), el cual requiere grandes volúmenes de filamento polimérico. Dado el creciente interés en este campo a nivel académico, recreativo e industrial, se considera que representa una gran oportunidad para el aprovechamiento de los residuos de PET [5, 6].

Planteamiento del problema de diseño

La creciente disponibilidad del prototipado 3D tipo FDM como el método de manufactura aditiva más ampliamente usado tanto por instituciones académicas como por aficionados y emprendedores [7]; junto con la creciente preocupación por el cierre del ciclo de vida de los productos poliméricos (especialmente los denominados plásticos de un solo uso) [8]; han convertido la producción de filamento reciclado a partir de residuos poliméricos en un tema de interés, debido a sus potenciales beneficios tanto ecológicos como económicos.

Para este propósito, además de las extrusoras de filamento industriales usadas por los fabricantes comerciales de filamento, se han creado también extrusoras caseras para el uso en el hogar. Algunas de estas son producidas y comercializadas en masa, como las producidas por la marca Wellzoom; otras son parte de proyectos de código abierto, como la familia RecycleBot [9]. Algo que estas extrusoras caseras tienen en común es su incapacidad para procesar residuos poliméricos enteros: no cuentan con un método de reducción del material, por lo que el material debe encontrarse previamente triturado o granulado. El problema de la reducción del material es especialmente aplicable al PET, ya que uno de sus principales usos es la producción de envases y

botellas, lo que significa que el material sin reducir contiene un alto volumen de espacio vacío, dificultando su almacenamiento y tratamiento.

Para utilizar la extrusora, el usuario puede intentar reducir el material manualmente o mediante herramientas que tenga a la mano (en un artículo para 3Ders, Joshua Pearce [9], uno de los principales contribuidores al diseño del proyecto RecycleBot, mencionó haber reducido los residuos para las pruebas de su diseño, cortando el material en trozos manualmente y después pasándolo por una trituradora de papel), un proceso que no solo consume tiempo, sino también puede ser peligroso para el usuario o sus herramientas ya que implica uso inadecuado de las mismas. También puede intentar conseguir una trituradora o granuladora de plástico; sin embargo, los modelos existentes van dirigidos a ambientes industriales, por lo que tienden a representar una inversión demasiado grande, consumir demasiada energía, ocupar demasiado espacio, y ser demasiado ruidosas para los usuarios. Una última opción es la adquisición del material ya reducido en forma de escamas. Sin embargo, además de representar un gasto para el usuario, esta opción tiende a retirar parte del atractivo ecológico de una extrusora de filamento casera, pues el proceso de recolección, transporte y el equipo necesario para la producción de pellets en un sistema de reciclaje convencional lo hace más costoso por kilo de material que el reciclaje directo realizado por el consumidor [9].

Todas las opciones anteriores presentan inconvenientes de índole económica y ecológica que podrían ser eliminados mediante la creación de una extrusora de filamento reciclado con la integración de un sistema mecánico de reducción del material. Sin embargo, dicha integración representa una serie de retos relacionados con la reducción del material. Como ya se mencionó, el método convencional de triturado de desechos plásticos es un proceso ruidoso, y energéticamente costoso y realizado con equipos que ocupan mayor espacio. Las trituradoras de

plástico disponibles en el mercado colombiano usan motores trifásicos de dos caballos de fuerza, lo cual lo hace adecuado para aplicaciones industriales, pero lo descalifica para su aplicación en el hogar.

El problema de diseño, por lo tanto, es encontrar un método de reducción mecánica del material de entrada con un menor consumo energético, menor ocupación de espacio, que produzca menor contaminación auditiva, y que ofrezca una integración con un sistema de extrusión de filamento reciclado.

Pregunta de diseño

¿Cómo desarrollar un sistema para la transformación de residuos de PET en filamento para prototipado 3D tipo FDM?

Justificación

En Colombia, se producen aproximadamente 14 millones de toneladas de residuos sólidos al año [10], 1 millón de las cuales son de origen polimérico [11]. Según Daniel Mitchell [8, 10], presidente de Acoplásticos, aproximadamente entre el 85% y el 90% de estos residuos termina en rellenos sanitarios.

La Política Nacional para la Gestión de Residuos Sólidos plantea como uno de sus objetivos llegar a un aprovechamiento del 30% de los residuos sólidos producidos en el país para el año 2030 [12].

Entidades gubernamentales como el Departamento Nacional de Planeación DNP y el Ministerio de Vivienda se encuentran actualmente tomando medidas para lograr este cometido mediante la implementación de sistemas de reciclaje urbano. Un ejemplo es el proyecto “Hacia

el reconocimiento y la institucionalización del reciclaje inclusivo en Colombia”, liderado por el Ministerio de Vivienda y desarrollado por Compromiso Empresarial para el Reciclaje (CEMPRE) Colombia, cuyo objetivo es fomentar la implementación de Sistemas Urbanos de Reciclaje Inclusivo en municipios del país mediante la prestación de herramientas para la formulación de programas de Gestión de Residuos Sólidos y la incorporación y fortalecimiento de organizaciones de recicladores como entidades prestadoras del servicio de aseo. Además de esto, empresas del sector privado se dedican al reciclaje de residuos sólidos. En el caso del PET, Apropet y Enka se dedican a la transformación de botellas de este material, transformando aproximadamente 31200 toneladas de botellas de PET al año [13].

Sin embargo, Colombia aún se encuentra lejos de alcanzar el objetivo del 30% de reciclaje. Es posible que estas medidas puedan complementarse con la implementación de sistemas de reciclaje y transformación de residuos en el hogar. Debido a su relación con la cultura maker (subcultura contemporánea basada en la creación, construcción y reciclaje de dispositivos electrónicos para recreación, uso personal e interés académico; estrechamente relacionada con áreas como la ingeniería, la electrónica y el prototipado 3D [14]) y su consumo de material polimérico como materia prima, el prototipado 3D puede ser un buen campo para fomentar la reciclaje y transformación de residuos sólidos poliméricos en el hogar.

El prototipado 3D es una industria tecnológica creciente en los campos de la medicina, la educación, la producción en masa y el consumo personal. Se pronostica que la inversión en esta industria a nivel mundial presentará un crecimiento anual del 19,1% en el periodo 2019-2024, con el gasto en el segmento de materiales presentando un crecimiento del 20,3% [5].

El crecimiento del prototipado 3D polimérico en el mercado (y en particular el crecimiento del gasto en materiales) significa la introducción a las empresas, hogares y entidades educativas de un nuevo proceso productivo que utiliza material polimérico como materia prima, lo que representa un mayor consumo de polímeros, pero también una nueva oportunidad para cerrar el bucle de los desechos poliméricos como los productos de PET de un solo uso.

Según Joshua Pearce [9] de la Universidad Tecnológica de Michigan, una de las principales ventajas ambientales de la conversión de desechos poliméricos en filamento para extrusión 3D en casa con respecto a los programas convencionales de reciclaje urbano es el menor consumo energético, ya que en un programa de reciclaje urbano ideal “(...) se debe transportar el material una vez para ser recolectado, otra vez para ser reciclado, y una tercera vez para ser convertido en productos”. Según Pearce, si se tiene en cuenta el ahorro energético del transporte, en ciudades pequeñas se estaría ahorrando un 70-80% de energía con respecto al reciclaje convencional del mismo volumen de residuos.

Además del ahorro energético que representa con respecto a programas de reciclaje convencionales, la disponibilidad de un sistema de reciclaje de residuos sólidos termoplásticos para la fabricación de filamento para impresión 3D presentaría ventajas para el usuario. Al eliminar el intermediario en el proceso de reciclaje, permitiría al usuario reciclar sus propios desechos y obtener el producto reciclado directamente sin tener que comprarlo, lo que representa un ahorro económico.

Así mismo, permitiría al usuario reciclar no solo residuos provenientes de productos de PET como botellas o envases, sino también modelos de impresión 3D dañados o defectuosos

realizados previamente por el usuario. Esto contribuiría no solo a cerrar el ciclo de vida de los envases de PET, también aumentar la circularidad del proceso de impresión 3D en sí mismo.

Al permitir reducir necesidad de filamento virgen, facilitar la reintegración a la cadena productiva de los residuos de PET, y aumentar la circularidad del proceso de impresión 3d al permitir convertir prototipos dañados o defectuosos en nueva materia prima, el uso de un sistema como este estaría contribuyendo a los tres pilares de la economía circular [15]:

- **Preservar y mejorar el capital natural:** Fomentar el uso de filamento reciclado entre los usuarios del prototipado 3D gradualmente puede convertir la industria de la impresión 3D en una con un consumo menor de recursos naturales.
- **Optimización de los recursos:** Si las impresiones realizadas en el filamento reciclado se pueden volver introducir al sistema para ser convertidas nuevamente en filamento cuando ya no se necesiten (o en caso de dañarse o salir defectuosas), se estaría optimizando la vida útil de cada kilogramo de PET procesado.
- **Fomentar la eficacia del sistema:** Al reutilizar residuos de PET provenientes de contenedores alimentarios de un solo uso y reducir la cantidad de PET que termina en rellenos sanitarios, se reducirían las externalidades de las actividades productivas de la industria alimentaria.

1. Identificación del proyecto

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema que permita transformar residuos sólidos de PET en filamento utilizable para prototipado 3D tipo FDM, facilitando su reaprovechamiento.

1.1.2 *Objetivos Específicos*

- Diseñar un dispositivo de reducción de material capaz de procesar residuos sólidos de PET y transformarlos en pellets utilizables para la extrusión mediante la aplicación de una fuerza cortante.
- Diseñar un dispositivo de extrusión que sea capaz de fundir los pellets producidos y extruirlos en forma de filamento para prototipado 3D mediante la aplicación de calor y presión.
- Diseñar un sistema que permita controlar el funcionamiento del dispositivo de extrusión mediante la entrada de comandos del usuario que se traduzcan en ajustes a la velocidad y temperatura
- Verificar el funcionamiento del sistema diseñado y la viabilidad de su proceso de producción de filamento mediante la construcción de un modelo funcional del sistema y la aplicación de pruebas de verificación.

2. Marco teórico

2.1 Economía circular

La economía circular es una estrategia que tiene como objetivo disminuir la entrada de materia prima virgen y la salida de residuos que se da en un sistema productivo, cerrando los “bucles” económicos y ecológicos de los recursos. Mientras que en una cadena de producción de la economía lineal siempre se requiere materia prima virgen y la disposición final es el fin del ciclo de vida del producto; en una cadena de producción de la economía circular la parte aprovechable de los recursos producidos al final del ciclo de vida del producto son reincorporados como nueva materia prima en el sistema productivo [15].

La economía circular busca en todo momento preservar la mayor utilidad y valor de los productos, y sus componentes y materiales. Para esto, se sustenta en tres pilares o principios fundamentales:

- Preservar y fortalecer el capital natural: Búsqueda de una utilización cada vez más eficiente de los recursos naturales, tratando de utilizar siempre la menor cantidad de recursos y buscando crear condiciones que faciliten su renovación.
- Optimizar el uso de los recursos: Extender el ciclo de vida de cada producto tanto como sea posible, dando así un mayor uso a los recursos naturales utilizados para producirlo.
- Fomentar la eficacia del sistema: Reducir las externalidades del proceso de extracción y utilización de los recursos naturales, tales como el uso de tierra, emisiones de gas carbono, volumen de desechos generado.

Actualmente el proceso de evolución de la economía lineal o tradicional a la economía circular se encuentra impulsada por 4 oportunidades que presenta [35]:

- **Económica:** La economía circular presenta el surgimiento de nuevas fuentes de empleo, ahorros en los costos netos de materiales, y la oportunidad de incrementar la actividad productiva sin incrementar el gasto de recursos naturales.
- **Ambiental:** Dada la reducción tanto de la entrada como la salida de materiales que conlleva la economía circular, las actividades productivas desarrolladas bajo este modelo tendrían un impacto ambiental menor.
- **Empresarial:** Demanda de nuevos servicios, creando nuevas oportunidades de negocio. Costo reducido de los materiales, mayor seguridad en el abastecimiento,
- **Individual:** Reducción en los costos de los productos y ciclos de vida más alargados, que conllevan a menores y menos frecuentes gastos para el consumidor.

2.2 Prototipado 3D o manufactura aditiva

El prototipado 3D, impresión 3D o manufactura aditiva es un proceso automatizado en el cual un objeto tridimensional es producido a partir de un modelo CAD mediante la adición sucesiva de capas de material, lo cual lo diferencia de procesos tradicionales de maquinado en los cuales son realizados mediante remoción de material.

FDM o Fused Deposition Modeling es un método de impresión 3D en el cual la entrada de material se da en forma de un flujo continuo de filamento polimérico termoplástico desde un carrete, el cual pasa por una boquilla extrusora móvil la cual deposita el material en la placa de impresión. Usualmente la boquilla se mueve en dos dimensiones en un plano horizontal para realizar cada capa, desplazándose luego verticalmente para comenzar una capa nueva. Su bajo costo comparado con otros medios de impresión lo hace el método de impresión 3D más popular

en el mercado, sobre todo entre aficionados y emprendedores: el 46% de los usuarios de máquinas de impresión 3D usan máquinas tipo FDM [7].

Los dos materiales más comunes utilizados para la producción de filamento para prototipado 3D tipo FDM son PLA y ABS. De los dos, el PLA o ácido poliláctico tiene menor impacto ambiental, ya que es derivado del almidón de maíz y es completamente biodegradable. Sin embargo, el ABS es preferido en muchos casos por la calidad de su acabado y su mayor resistencia mecánica y térmica, y su mayor relación fuerza-peso [17, 18]. Otros materiales comunes incluyen el TPU y aglomerados de PLA.

2.3 Polietileno Tereftalato

El PET, polietileno tereftalato, tereftalato de polietileno, o politereftalato de etileno es la resina polimérica termoplástica más común de la familia de los poliésteres. Es utilizado para la producción de fibras textiles, contenedores para alimentos y bebidas, empaques termoformados para medicamentos, y aglomerados de fibra de vidrio [3]. En la siguiente tabla se comparan algunas de las características del PLA, ABS y PET relevantes al proceso de impresión 3D

Tabla 1*Comparación de características del PLA, ABS y PET.*

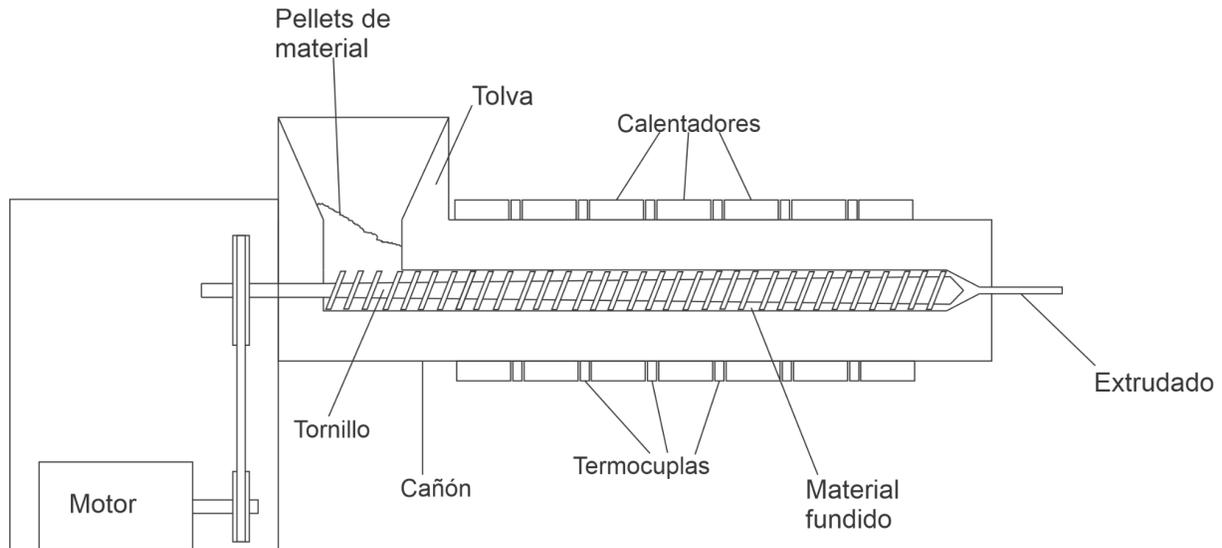
Características	PLA [17]	ABS [18]	PET [19]
Densidad (g/cm ³)	1.25	1.03-1.38	1.39
Temperatura de deflexión del calor (°C)	65	84-118	80-120
Temperatura de fusión (°C)	160	225	244-260
Módulo de Young (Gpa)	4	2.8	3.1
Resistencia a la tracción (Mpa)	50	110	72
Resistencia a la flexión (Mpa)	80	97	80

2.4 Procesos para la manufactura de filamento polimérico

La extrusión polimérica es un proceso mecánico por el cual se hace pasar un flujo continuo de polímero fundido o en estado visco-elástico por un dado o cabezal encargado de darle una forma deseada por medio del empuje generado normalmente por la acción giratoria de un tornillo de Arquímedes o husillo que gira concéntricamente a una cámara de temperatura controlada, denominada cañón. Este es el método utilizado para producir filamento para prototipado 3D tipo FDM [20]. En la figura 1 puede verse un esquema de este proceso.

Figura 1

Extrusora de filamento con tornillo de Arquímedes.



Para realizar exitosamente el proceso de extrusión, debe mantenerse el cañón por encima de la temperatura de transición vítrea del material, la cual es una temperatura (siempre inferior a la temperatura de fusión) en la cual se empieza a dar una transición entre un estado vítreo o sólido del material y un estado viscoso o gomoso. La temperatura de transición vítrea del PET es 70°C [21], así que entre los 70°C y los 255°C (su temperatura de fusión) se darán las condiciones óptimas para su extrusión.

Para realizar un proceso de extrusión, antes debe realizarse una reducción del material, es decir llevar las piezas más grandes del material a un estado en el que puedan ser introducidos en la tolva de la extrusora y procesados por el sistema de extrusión. La forma más común de reducir los materiales termoplásticos para extrusión es el triturado.

El triturado o trituración es un nombre dado a un número de procesos mecánicos que tienen como objetivo reducir el material de entrada a trozos de un tamaño menor. Dependiendo del material de entrada, el proceso de triturado puede consistir en la aplicación de presión, corte, impacto, fricción, entre otros métodos. A veces el término molienda es utilizado. La diferencia entre triturado y molienda está dado por el tamaño del gránulo del producto final. La trituración puede clasificarse en **desintegración grosera**, la cual se divide en trituración gruesa ($>15\text{cm}$), trituración mediana (3-15 cm) y trituración fina (0.5-3cm); y **desintegración fina**, la cual se divide en molienda gruesa (0.1-0.3mm) y molienda fina ($<0.1\text{mm}$). En el caso del reciclaje de residuos plásticos, los residuos pasan por un proceso de trituración fina para facilitar su termoformado para su reutilización [22, 23].

Los molinos trituradores usados actualmente en el proceso de reciclaje del plástico pueden clasificarse en molinos de bajas revoluciones y molinos de altas revoluciones, de la siguiente manera. [24]

Figura 2

Tipos de molinos trituradores.



Tomado de: Gaitán Hernández DF. [24]

Los molinos de bajas revoluciones requieren un menor consumo energético, pues se encuentran equipados con un conjunto de motor eléctrico y reductor, que proporcionan un alto torque a bajas velocidades. Por esta razón también son menos ruidosos que los molinos trituradores de altas revoluciones. Sin embargo, su construcción tiende a ser más costosa que la de los molinos de altas revoluciones debido a los materiales necesarios para sus discos de corte.

El más común de estos es el molino de dos ejes o de dos árboles, el cual cuenta con dos ejes compuestos de discos de corte de cantos agudos de acero de alta aleación, provistos con garfios rotatorios alternados que tienen la función de agarrar el producto a triturar y empujarlo contra el cilindro opuesto, logrando así el corte [25].

Similar al molino de dos ejes, el molino de 4 ejes se encuentra compuesto por dos cilindros provistos de discos de cantos agudos provistos con garfios cuya función es empujar el material a triturar contra los cilindros centrales, los cuales se encuentran provistos de un conjunto de fresas. Los cilindros adicionales facilitan el triturado de desechos plásticos con poca rugosidad que la trituradora de 2 ejes tendría dificultad procesando [26].

El molino mono-eje o mono-árbol cuenta con un solo rodillo dentado. El material a triturar es empujado contra el rodillo mediante el accionamiento de un cajón hidráulico, y la salida del material triturado se da por una rejilla perforada detrás del rodillo, que determina el tamaño final del material triturado. Este tipo de molino se utiliza para reducir residuos de elevado espesor y alta resistencia al corte [27].

Sin embargo, además del triturado es posible considerar otras formas de reducción de materiales termoplásticos, como la aplicación de calor y la fricción o abrasión.

2.5 Antecedentes de la situación de estudio

En Colombia, al igual que en el resto del mundo, el sector que lidera en el uso de prototipado 3D es el de la medicina, ya que la impresión 3D se ha posicionado como un excelente método para la elaboración de prótesis y biomodelos de implementación quirúrgica. Sin embargo, esta tecnología también se está popularizando como hobby, como idea para emprendimiento, y como medio de producción de objetos para consumo personal. Según empresas de impresión 3D que han surgido en los últimos años, como ProtoLab3D en Bogotá, los pedidos que más se reciben en un servicio de impresión 3D son prototipos de objetos como alcancías, vasos, envases y calzado [6].

Según el reporte del paisaje de la industria de la impresión 3D en 2019 realizado por la AMFG, aunque la impresión 3D en metal es el sector que más crecimiento presentó en el 2019, la impresión 3D polimérica ha tenido un crecimiento constante y significativo, teniendo aplicaciones más amplias en el mercado [28] (lo cual tiene sentido cuando se considera que la impresión 3D en metal se ha popularizado en los últimos años entre inversionistas y empresas de construcción a medida que nuevos avances se han hecho en el campo, pero la impresión 3D polimérica sigue siendo la más accesible para instituciones educativas, proyectos de emprendimiento, y personas interesadas en la tecnología como hobby).

La fabricación de filamento reciclado casero se ha vuelto un tema de interés entre los entusiastas de la impresión 3D, sobre todo en el sector académico y en el de consumo personal. Uno de los principales logros en el campo de la extrusión de filamento reciclado es RecycleBot: Un diseño open-source para una extrusora de filamento casera. Al ser un dispositivo de hardware open-source, sus planos, especificaciones de materiales, datos electrónicos y código fuente del

software necesario son lanzados gratuitamente para ser replicados o modificados por cualquier persona. El primer ejemplo de Recyclebot fue desarrollado por estudiantes de la Universidad Victoria de Wellington en Nueva Zelanda, aunque resultó ser incapaz de extruir material de calidad suficiente para ser usado en impresión 3D. Diseños posteriores han sido desarrollados en la Queen's University en Canadá y en la Universidad Tecnológica de Michigan, y han sido replicados por entusiastas de la impresión 3D, el ambientalismo, y la cultura maker [5].

Una dificultad que presenta el Recyclebot es que los modelos publicados requieren que el material de entrada se encuentre ya triturado o granulado, lo cual significa que el usuario debe triturar el material por cuenta propia o adquirirlo en forma de pellets, lo cual representa un paso extra en el proceso de convertir los desechos propios en filamento para impresión y, en el caso de los usuarios que compran pellets de material virgen para realizar la extrusión, anula las ventajas ecológicas de tener una extrusora en casa para material reciclado.

La patente europea EP 3479992 A1, creada por Frédéric Panthelgi, propone un sistema para la conversión de residuos poliméricos termoplásticos en filamento para impresión 3D el cual no requiere que los residuos de entrada se encuentren previamente triturados o granulados. Los residuos son reducidos e introducidos al tornillo de extrusión mediante un embudo el cual cuenta con un sistema de temperatura que le permita derretir el material [10]. De esta manera se simplifica el proceso de extrusión, ya que los residuos enteros pueden ser introducidos al dispositivo directamente después de ser limpiados. Sin embargo, esto significa que el embudo de entrada del material tendría que mantenerse a una temperatura constante de al menos 260°C (en caso del PET), lo cual podría llegar a representar un mayor gasto energético (y por lo tanto un mayor impacto ambiental) que si se redujera el material por medios mecánicos (dependiendo del

medio mecánico elegido). Esta patente aún no ha sido incorporada comercialmente a la industria de la impresión 3D.

Para sintetizar: En Colombia la impresión 3D. Como tecnología para producción se encuentra en crecimiento, y dicho crecimiento conlleva a una mayor inversión en material. La producción de filamento reciclado es un tema de interés tanto para instituciones educativas como para aficionados a la impresión 3D a nivel mundial, debido al ahorro económico y la reducción del impacto ecológico que representa. Se han diseñado diferentes dispositivos con este fin, aunque hasta ahora ninguno de los diseños que han alcanzado ningún tipo de implementación masiva ha incorporado el proceso de reducción del material y de extrusión en un solo dispositivo, llegando a complicar el proceso de producción de filamento reciclado y disminuyendo parte de su atractivo económico o ecológico.

3. Proceso de diseño

3.1 Identificación de requerimientos de diseño

3.1.1 *Requerimientos derivados de las propiedades del PET*

El PET tiene una resistencia al corte de 1.19-58.6 MPa (promedio 15.3 MPa), y una temperatura de fusión promedio de 244-260°C (promedio 246°C) [29]. Es decir, que para poder desempeñar su función, un sistema de reducción y extrusión debe ser capaz de aplicar al menos una fuerza de corte de 15.3 MPa para la reducción del material (en caso de decidir realizar reducción mecánica), y una temperatura de al menos 260°C.

3.1.2 *Benchmarking*

A continuación se comparan algunas de las alternativas más notables que existen en el mercado para la producción de filamento para impresión 3D en casa, con el fin de establecer una referencia para las características del dispositivo a diseñar.

Filabot EX6 Extruder

Características:

- Control manual de velocidad (0-100 RPM)
- Control manual de temperatura. Tres zonas termales separadas, con regulación de temperatura independiente (Max 450°C)
- Tornillo extraíble
- Dados de extrusión intercambiables (1.75 y 2.85)
- Peso: 23 Kg
- Dimensiones: 75.44 x 23.11 x 21.4 cm (37309.15 cm³)
- Precio: USD \$9899

Pros:

- Calidad industrial
- Alto nivel de control para ajustarse a las características físicas de diferentes polímeros
- Presenta la posibilidad de adquirir accesorios adicionales para el enfriamiento e hilado del material.

Contras:

- Precio elevado, presenta una inversión significativa, por lo que es más conveniente para usuarios que usan la impresión 3D como proyecto de emprendimiento y tienen la posibilidad de recuperar su inversión, y no para usuarios que la utilizan como hobby o para proyectos académicos.
- Cuenta con accesorios para el enfriamiento e hilado del material, pero no para la reducción del material previa a la extrusión.
- Aunque la variedad de opciones para la extrusión permite una alta capacidad para la personalización del proceso, también significa que el usuario tendrá que enfrentarse a una curva de aprendizaje más empinada para aprender a utilizar el dispositivo correctamente debido a la cantidad de factores a considerar para la extrusión.

Wellzoom B2 Desktop Extruder

Características:

- Boquillas intercambiables (1.75 y 3 mm)
- Ajuste manual de temperatura: Max 300°C
- Velocidad de extrusión 10-26 pulgadas/min

- Uso de motor de paso para mayor precisión en el ajuste de velocidad
- Dimensiones: 50.8 cm x 14 cm x 25.4 cm (18064 cm³)
- Contador de metros extruidos
- Accesorios opcionales para el enfriamiento e hilado del filamento.
- Potencia del motor: 150w
- Precio: \$600-1200 USD

Pros:

- Precio más accesible a usuarios que utilizan la impresión 3D como hobby o para fines académicos
- Uso más simple, con menos variables a considerar
- Tamaño considerablemente reducido con respecto a otras alternativas, siendo más adaptada al hogar o a un espacio académico

Contras:

- Menor posibilidad para adaptar el perfil de calor del proceso de extrusión a las características específicas del material, debido a tener una sola zona de calor.
- Al igual que la alternativa anterior, no cuenta con un accesorio para reducir el material a extruir, lo cual significa que se debe reducir por otros medios antes.

RepRapable Recyclebot

Características:

- Open-source, el dispositivo no es comercializado, sino que los planos, listas de materiales, diagramas PCB y código son compartidos libremente a través de diversas plataformas, donde los usuarios interesados pueden descargarlo, o incluso crear y compartir versiones modificadas con adaptaciones o mejoras.

- RepRapable, es decir, que sigue la filosofía del proyecto ReRap: el dispositivo está diseñado para permitir la producción mediante impresión 3D de tantas de sus partes como sea posible, permitiendo así al dispositivo producir el material necesario para sus propias reparaciones, o para producir una porción significativa de las partes necesarias para crear una réplica de sí misma.
- Debido a la naturaleza del proyecto, es imposible dar un valor definitivo para costos, dimensiones, o peso, y, ya que sus características específicas dependerán del usuario final.

Pros:

- Altamente adaptable, ya que el usuario que lo construye puede realizar modificaciones acorde a sus necesidades.
- El costo del dispositivo es igual solo al de los materiales necesarios para construirlo.
- Incorpora los principios de la economía circular, ya que el filamento producido puede utilizarse para repuestos y reparaciones del mismo dispositivo, y las partes dañadas pueden usarse para producir nuevo filamento.

Contras:

- Requiere una mayor dedicación de esfuerzo y tiempo, ya que no se ofrece preensamblado, solo se ofrece la documentación para que el usuario lo ensamble.

Conclusiones del benchmarking:

- Todos los sistemas analizados requieren el uso de otro equipo separado para la reducción del material antes de su procesamiento. El contar con un equipo compacto para este procedimiento por lo tanto presenta un valor agregado.

- De acuerdo a las alternativas consultadas, el rango aceptable para la dimensiones del sistema a diseñar debería producir un volumen de 18000 a 36000 cm³ (18 a 36 dm³), que son los volúmenes de las alternativas que existe. De preferencia, debería ser menor a esto. Cabe resaltar, sin embargo, que el volumen de 18 dm³ para la Wellzoom B2 y 3 dm³ para la Filabot EX6 no incluye el volumen de periféricos tales como el sistema de enfriamiento, y que el sistema a diseñar va a incluir no sólo un sistema de extrusión sino también uno de reducción de material, por lo cual se debería considerar un rango más leniente.
- El peso del sistema debería ser preferentemente menor a 23kg, ya que este es el precio de la Filabot EX6, la cual tiene un peso y dimensiones bastante elevados pero que se justifican debido al grado de control que ofrece para mejorar la calidad del filamento.
- Desde el punto de vista de la sostenibilidad y la circularidad, la extrusora Recyclebot muestra claras ventajas por encima de las otras alternativas actualizadas debido a ser un proyecto Open-Source, ya que la facilidad para ser reparada y mejorada por el usuario y la capacidad de poder procesar algunas de sus propias partes extienden su vida útil. Estas características pueden sentar una buena base para el sistema a diseñar.

3.1.3 Indagación con usuarios líderes

Para comenzar a identificar los deseos del usuario, se realizó una entrevista con dos usuarios líderes que son usuarios frecuentes de prototipado 3D.

Participantes: Efraín Vega, instructor del Servicio Nacional de Aprendizaje Sena. Israel Garnica, profesor de la escuela de Diseño Industrial de la UIS.

Tipo de entrevista: Entrevista semiestructurada. Se aplicó una serie fija previamente definida de preguntas abiertas.

Medio: Chat

Preguntas: (Nota: Antes de la aplicación de las preguntas se explicó a los usuarios líderes que el objetivo de la entrevista era identificar la lista de necesidades y requerimientos de diseño para el diseño de un equipo para convertir desechos de PET en filamento para prototipado 3D para uso en un entorno doméstico o educativo)

- ¿Considera el concepto del proyecto una buena idea? ¿Por qué?
- ¿Cómo se imagina el producto a desarrollar?
- ¿Qué características consideraría necesarias para el producto?
- ¿Qué otras características le gustaría que tuviera?
- ¿Qué características o atributos deberían evitarse ya que podrían empeorar su experiencia o causar problemas?

Resultados: A través de las entrevistas, se obtuvo la siguiente información:

- Es necesario que el sistema garantice la homogeneidad del calibre del filamento durante todo el proceso de extrusión.
- Como mínimo, el sistema debería ser capaz de extruir filamento de PET en calibre 1.75mm, pero idealmente debería ser capaz de extruir filamento de diferentes materiales y con diferentes calibres.
- Aunque no es estrictamente necesario, sería deseable que contara con un sistema de extracción de gases durante la extrusión, ajuste manual de temperatura y velocidad, reducción de ruido, sistema de embobinado, sensor de metros extruidos.

- Si no se cuenta con alguna forma de limpiar el interior de la extrusora, la capacidad de extruir diferentes tipos de polímeros puede ser contraproducente ya que la mezcla de diferentes polímeros dentro del barril de extrusión puede afectar sus características.

3.1.4 Consideraciones de seguridad

Dado que el sistema a diseñar manejará altas temperaturas, partes cortantes, y motores que producirán un cierto nivel de ruido, es importante definir en los requerimientos de diseño límites y regulaciones que permitan mitigar los riesgos de salud que estos representan.

La temperatura más baja que puede producir quemaduras en el ser humano es 44°C, la cual requiere exposición prolongada (de alrededor de 6 a 7 horas) para producir quemaduras. Una temperatura de alrededor de 70°C es suficiente para producir quemaduras instantáneamente[30]. Esto significa que la temperatura de las partes exteriores del sistema debe ser inferior a 70°C, e idealmente debe ser menor a 44°C.

Exposición prolongada a ruidos por encima de los 70 dB puede causar daño a los oídos, tal como pérdida temporal o permanente de audición, y ruidos por encima de los 120 dB pueden causar daño instantáneo[31]. Por lo tanto, el ruido producido por el sistema debe ser menor a los 70 decibeles.

Por último, el sistema de reducción del material puede causar daño cortante grave al usuario, especialmente si existe riesgo de inserción accidental de manos o dedos. Es por esto que el acceso físico al sistema de reducción debería ser imposible mientras éste se encuentre en funcionamiento.

3.1.5 Método KANO

Para establecer la importancia del cumplimiento de los deseos del usuario identificados en las secciones anteriores, se empleó el método KANO. El método KANO es una herramienta

de desarrollo de productos que permite asignar prioridad al cumplimiento de diferentes atributos de un producto, al clasificar estos atributos de acuerdo a la relación entre su cumplimiento y la satisfacción del usuario [32]. Las categorías en que el método KANO clasifica los atributos de un producto son:

- **Básico:** Los atributos básicos deben ser cumplidos obligatoriamente, pues su falta elimina por completo la satisfacción del usuario
- **Performance:** Existe una relación directamente proporcional o correlacionada entre el nivel de cumplimiento del atributo y el nivel de satisfacción del usuario.
- **Delighter:** El cumplimiento del atributo aumenta la satisfacción del usuario, pero su incumplimiento no lo disminuye.
- **Indiferente:** El cumplimiento o incumplimiento con el atributo evaluado no afecta el nivel de satisfacción del usuario.
- **Inverso:** El cumplimiento con el atributo afecta negativamente la satisfacción del cliente
- **Cuestionable:** La aplicación del método KANO produjo respuestas conflictivas

Para la aplicación del método KANO, se aplica un cuestionario con el fin de evaluar cualitativamente la reacción de los posibles usuarios en caso de que cada atributo a clasificar estuviera o no estuviera presente, con el siguiente formato:

Pregunta funcional:

Si el objeto/producto/dispositivo cuenta con (atributo), ¿Cómo se sentiría?

- a. Me gusta
- b. Es algo básico
- c. Me da igual
- d. No me gusta pero lo tolero

- e. No me gusta y no lo tolero

Pregunta disfuncional:

Si el objeto/producto/dispositivo no cuenta con (atributo), ¿Cómo se sentiría?

- a. Me gusta
- b. Es algo básico
- c. Me da igual
- d. No me gusta pero lo tolero
- e. No me gusta y no lo tolero

Dado que el método KANO solo puede presentar una evaluación subjetiva de la valoración del usuario para cada atributo, se excluyeron de su aplicación los requisitos técnicos, utilizándose solo para evaluar y jerarquizar los atributos relacionados con características potencialmente deseables pero no indispensables para el funcionamiento básico del dispositivo, tales . A continuación se presentan las el cuestionario utilizado para la aplicación del método KANO en este proyecto:

Introducción: El presente cuestionario busca jerarquizar los requerimientos de diseño para un sistema de reciclaje el cual tiene como objetivo convertir residuos sólidos de PET en filamento para impresión 3D. El cuestionario consiste en 16 preguntas de selección múltiple referentes a los atributos que podrían o no estar presentes en el dispositivo.

1. Si el dispositivo tiene un sistema para realizar extracción de gases al momento de la extrusión, ¿Cómo se sentiría?
2. Si el dispositivo no tiene un sistema para realizar extracción de gases al momento de la extrusión, ¿Cómo se sentiría?
3. Si el dispositivo tiene ajuste manual de temperatura, ¿Cómo se sentiría?

4. Si el dispositivo no tiene ajuste manual de temperatura, ¿Cómo se sentiría?
5. Si el dispositivo tiene control manual de velocidad de extrusión, ¿Cómo se sentiría?
6. Si el dispositivo no tiene control manual de velocidad de extrusión, ¿Cómo se sentiría?
7. Si el dispositivo cuenta con sensor de metros extruidos, ¿Cómo se sentiría?
8. Si el dispositivo no cuenta con sensor de metros extruidos, ¿Cómo se sentiría?
9. Si el dispositivo cuenta con un sistema de reducción de ruido, ¿Cómo se sentiría?
10. Si el dispositivo no cuenta con un sistema de reducción de ruido, ¿Cómo se sentiría?
11. Si el dispositivo cuenta con la capacidad de extruir filamento de diferentes diámetros, ¿Cómo se sentiría?
12. Si el dispositivo sólo puede extruir filamento de un diámetro (1.75mm), ¿Cómo se sentiría?
13. Si el dispositivo cuenta con la capacidad de extruir filamento de diferentes materiales, ¿Cómo se sentiría?
14. Si el dispositivo solo cuenta con la capacidad de extruir filamento de un material (PET) ¿Cómo se sentiría?
15. Si el dispositivo cuenta con un sistema hilador que enrolla el filamento automáticamente, ¿Cómo se sentiría?
16. Si el dispositivo no cuenta con un sistema hilador que enrolla el filamento automáticamente, ¿Cómo se sentiría?

El cuestionario fue aplicado por medio de la plataforma Google Forms a una muestra de 25 participantes.

Criterios de inclusión: Rango de edad: 18-50 años. Experiencia previa con procesos de prototipado 3D, o interés en los mismos.

Tabla 2*Frecuencia de respuestas al cuestionario de aplicación del método KANO*

Pregunta	Me gusta	Es algo básico	Me da igual	No me gusta pero lo tolero	No me gusta y no lo tolero
Pregunta 1	60%	28%	8%	/	/
Pregunta 2	/	/	40%	28%	32%
Pregunta 3	50%	32%	8%	/	4%
Pregunta 4	/	8%	8%	16%	68%
Pregunta 5	44%	40%	12%	4%	/
Pregunta 6	/	4%	28%	24%	44%
Pregunta 7	72%	4%	24%	/	/
Pregunta 8	52%	4%	4%	28%	12%
Pregunta 9	52%	32%	8%	4%	4%
Pregunta 10	/	4%	20%	52%	24%
Pregunta 11	68%	16%	16%	/	/
Pregunta 12	/	8%	32%	40%	20%
Pregunta 13	84%	4%	8%	/	4%
Pregunta 14	8%	4%	20%	44%	24%
Pregunta 15	72%	16%	12%	/	/
Pregunta 16	/	8%	36%	36%	20%

De acuerdo a los resultados obtenidos, se asignó a los atributos evaluados una categoría que definirá la priorización que se debe dar a su cumplimiento:

Delighter: Sistema de extracción de gases, sensor de metros extruidos, reducción de ruido, capacidad de extruir filamento de diferentes diámetros, capacidad de extruir diferentes materiales, sistema que enrolle el material automáticamente.

Performance: Control manual de velocidad y temperatura

3.1.6 Tabla PRS

PRS o Product Requirement Specifications es un documento que permite recoger los requerimientos de diseño para un producto a desarrollar, así como sus parámetros de medición, valores aceptables, métodos de verificación, prioridad, y referencias o estándares, si estos

campos son aplicables. La siguiente tabla PRS recoge los requerimientos identificados en las secciones anteriores.

Tabla 3
Product Requirement Specifications

COD.	Categoría	Descripción	Parámetro Unidad de medida	Valor(es) de aceptación	Parte o componente relacionado	Test	Priorización	Referencias o estándares
D001	Dimensiones	Peso del sistema	Kg	<20	Sistema completo	Peso en una balanza	Delighter	Benchmarking (Wellzoom B2)
D002	Dimensiones	Volumen del sistema	dm ³	<18-37	Sistema completo	Medición de dimensiones del modelo CAD	Delighter	Benchmarking (Wellzoom B2 y Filabot EX6)
F001	Funcionamiento	Diámetro del filamento extruido	mm	1,75 (si no se decide incluir el requerimient o F003); 1,75-2,85-3 (si se decide incluir el requerimient o F003)	Cabezal de extrusión	Medición del filamento extruido en diferentes para promediar	Básico	Estadísticas de los diámetros estandarizados de filamento más utilizados
C001	Calidad	Margen de error del diámetro del filamento extruido	mm	±0,05	Cabezal de extrusión	Desviación estándar del promedio del diámetro de filamento	Básico	Benchmarking (Wellzoom B2 y Filabot EX6)
F002	Funcionamiento	Rango de temperaturas alcanzado	°C	120-295	Sistema de calefacción	Medición de temperatura interna con sistema de termocupla	Básico	Matweb, Overview of materials for Polyethylene Terephthalate (PET), Unreinforced
F003	Funcionamiento	Capacidad de extruir material de diferentes diámetros	N/A	N/A	Cabezal de extrusión	N/A	Delighter	Benchmarking y entrevistas con usuarios líderes
F004	Funcionamiento	Capacidad de extruir filamento de diferentes materiales	N/A	N/A	Sistema de calefacción, control de temperatura	N/A	Delighter	Benchmarking y entrevistas con usuarios líderes
I001	Interfaz	Sistema de control preciso de temperatura	N/A	N/A	Cañón de extrusión, sistema de calefacción, interfaz de usuario, sensor de temperatura	N/A	Básico	Benchmarking (Wellzoom B2, Filabot EX6 y Recyclebo)

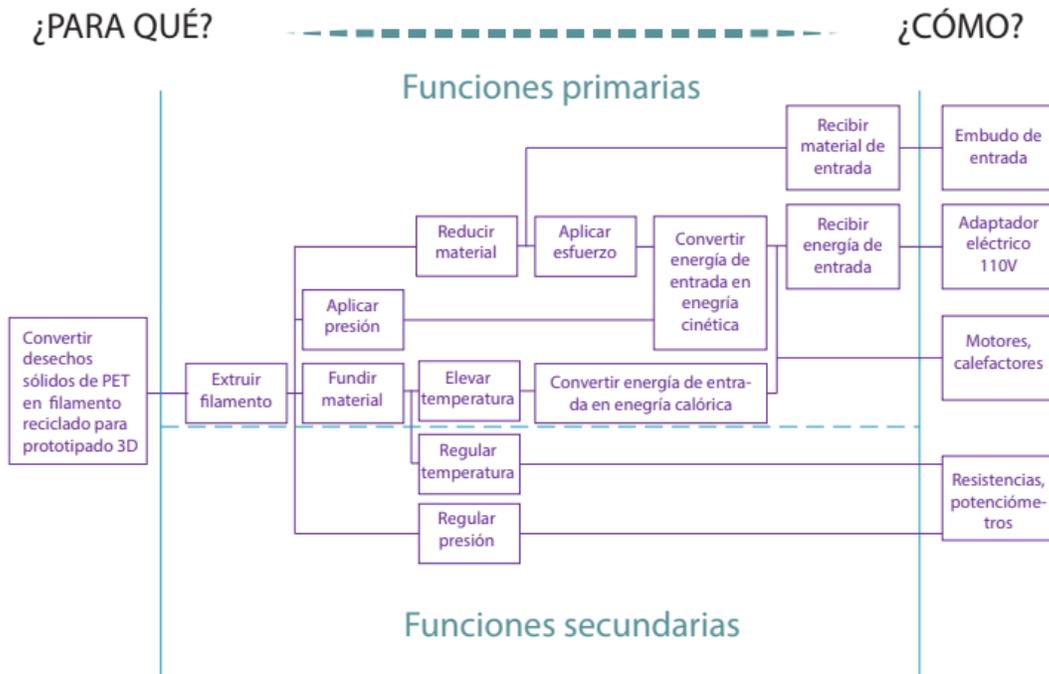
I002	Interfaz	Control de velocidad de extrusión	N/A	N/A	Motor, interfaz de usuario	N/A	Básico	Benchmarking (Wellzoom B2, Filabot EX6 y Recyclebot)
I003	Interfaz	Sensor de metros extruidos	N/A	N/A	Interfaz de usuario	N/A	Delighter	Benchmarking (Wellzoom B2, Filabot EX6)
F006	Funcionamiento	Sistema hilador que enrolle el filamento extruido en un carrete	N/A	N/A	Hilador	N/A	Delighter	Benchmarking (Wellzoom B2, Filabot EX6 y Recyclebot)
S001	Seguridad	Límite del nivel de ruido producido	dB	<70	Motor, sistema de reducción de material, sistema de reducción de ruido	Prueba con sonómetro	Básico	World Health Organization
F007	Funcionamiento	Esfuerzo cortante aplicada a los residuos a reducir	MPa	>58,6 Mpa	Motor, sistema de reducción, engranajes	Calculado matemáticamente	Básico	Matweb, Overview of materials for Polyethylene Terephthalate (PET), Unreinforced
S002	Seguridad	Temperatura externa	°C	<75 (aceptable), <45 (ideal)		Medida con termómetro en diferentes puntos de la superficie externa	Básico	World Health Organization
S003	Seguridad	El sistema de reducción del material no se acciona mientras se encuentre expuesto para evitar lesiones al usuario	N/A	N/A	Sistema de reducción, tapa, circuito interno	N/A	Básico	N/A
F008	Funcionamiento	Velocidad de extrusión del filamento	cm/m	10-26	Extrusora	Cronometrado	Delighter	Benchmarking (Wellzoom B2)

3.2 Ideación

En el siguiente diagrama (*Figura 3*) se ilustran las principales funciones que el dispositivo deberá realizar para cumplir su objetivo, y la relación entre ellas y diferentes partes funcionales del dispositivo.

Figura 3:

Diagrama FAST de funciones del dispositivo



A continuación se presentan alternativas e ideas iniciales para el cumplimiento de estas tareas, las cuales serán refinadas durante el curso del proceso de diseño hasta llegar a un diseño detallado final.

Para la entrada de material, se plantean inicialmente dos alternativas, una con una tolva convencional (Figura 4), y un diseño basado en y un diseño basado en dos cilindros concéntricos (Figura 5)

Figura 4:

Alternativa 1 de entrada de material

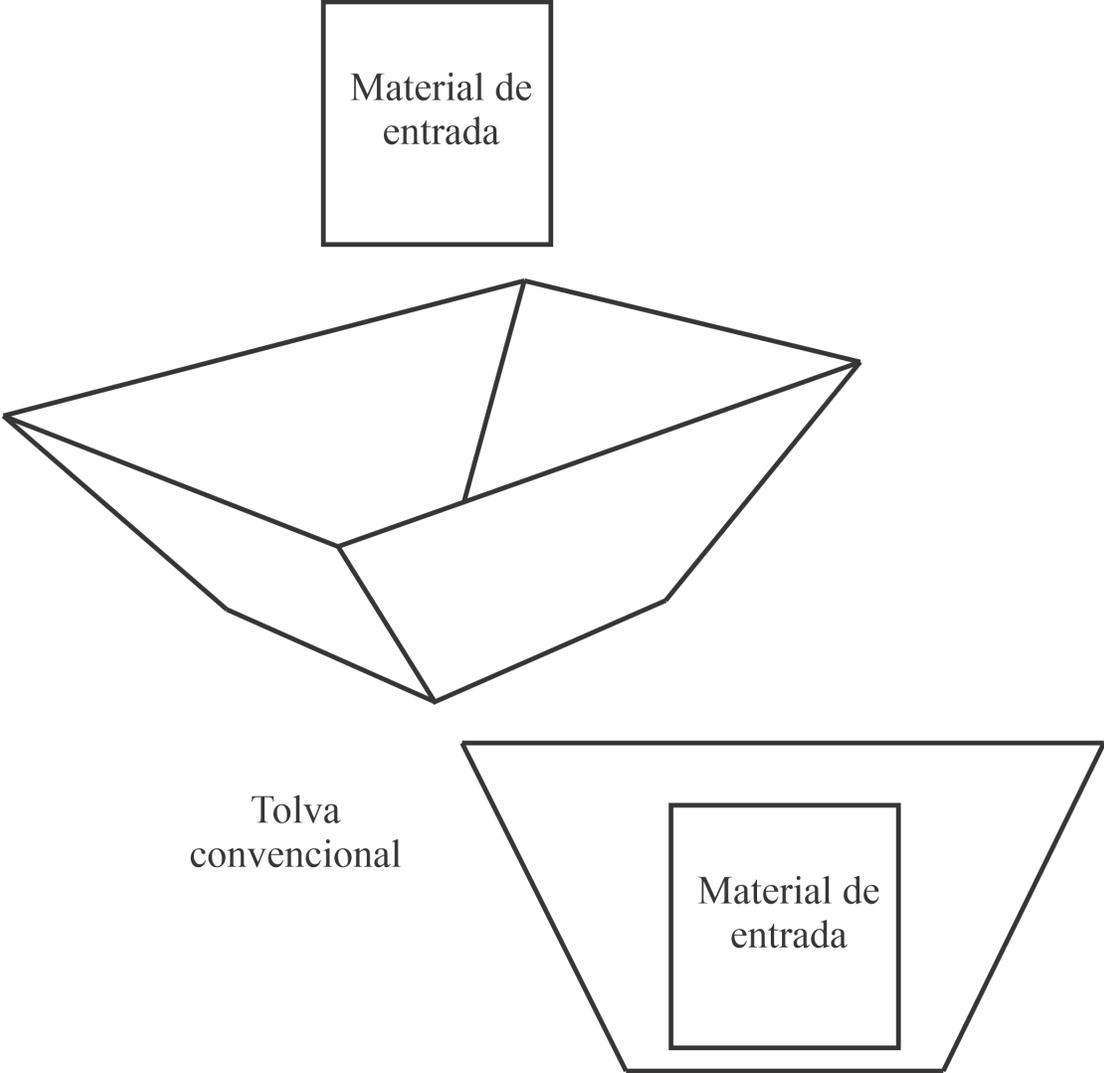
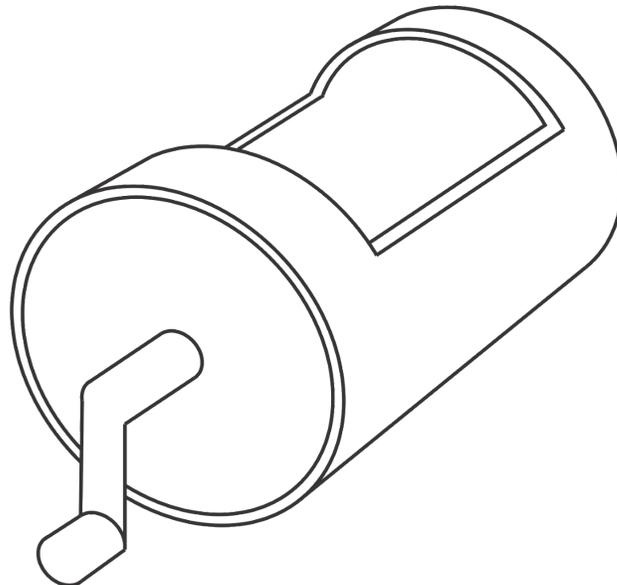
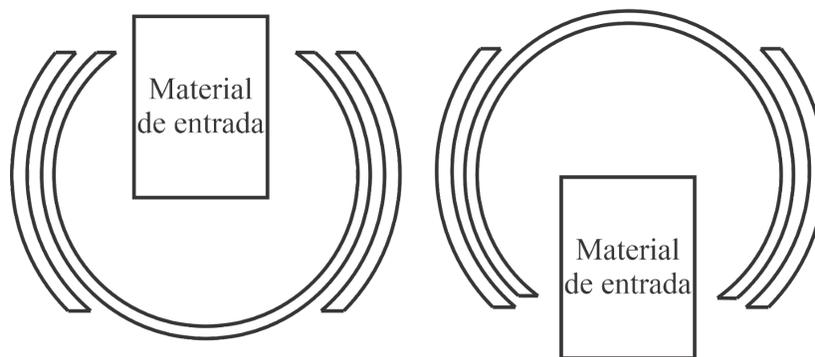


Figura 5

Alternativa 2 de entrada de material



Sección transversal:



El cilindro interior permite la entrada del material y después rota para permitir su paso al sistema de reducción

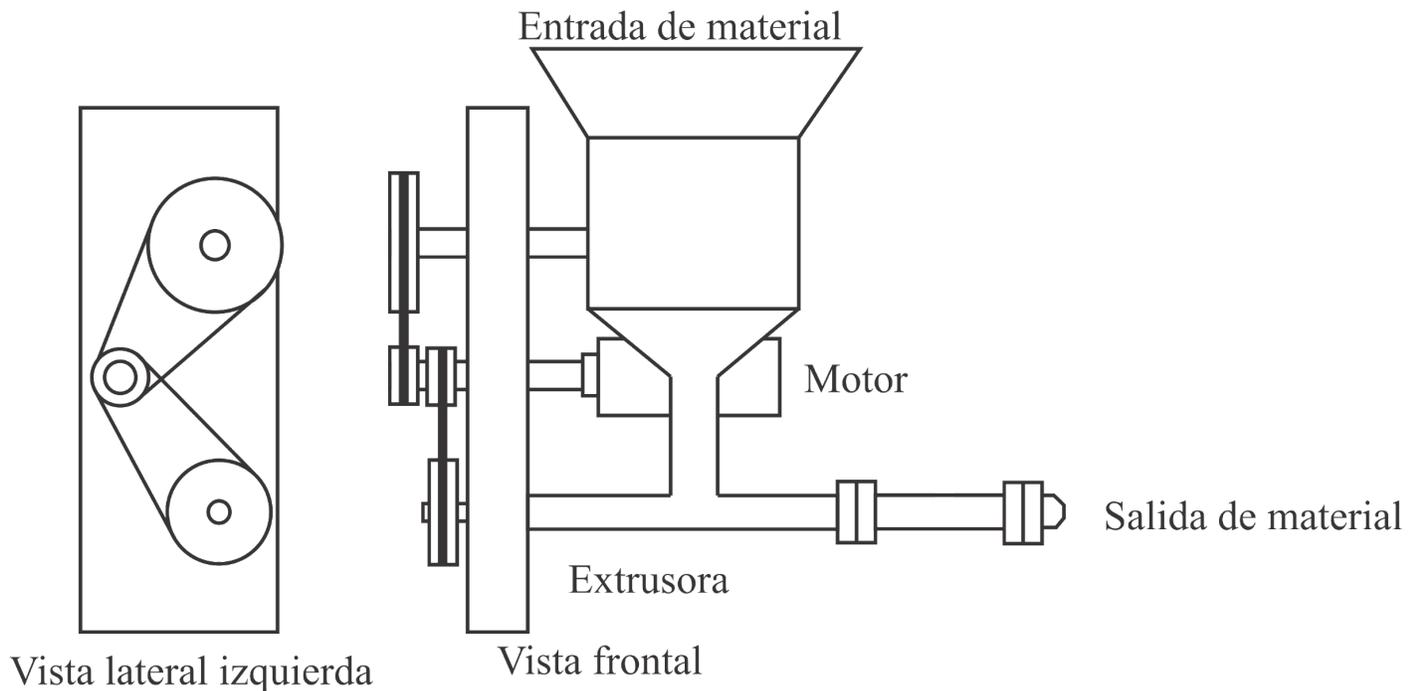
Mientras que la construcción de la alternativa 1 es más sencilla y menos costosa, la alternativa 2 presenta un mayor grado de cumplimiento con los requerimientos de seguridad, ya que permite el ingreso del material al área de reducción sin permitir el ingreso de las manos del usuario.

El sistema de reducción se encarga de reducir el material ingresado a un tamaño que sea manejable para el sistema de extrusión. Por lo tanto, requiere una fuente de energía cinética, y una forma de transmitir esta energía cinética al material a reducir para producir una fuerza cortante.

La alternativa más simple para una fuente de energía cinética para la reducción del material es utilizar el mismo motor para la reducción y la extrusión del material (Figura 6), sin embargo, esto significa que estos dos sistemas no podrían ser accionados o ajustados independientemente uno del otro.

Figura 6

Alternativa 1 de fuente de movimiento para el sistema de reducción del material. Utilizar el mismo motor que el sistema de extrusión.



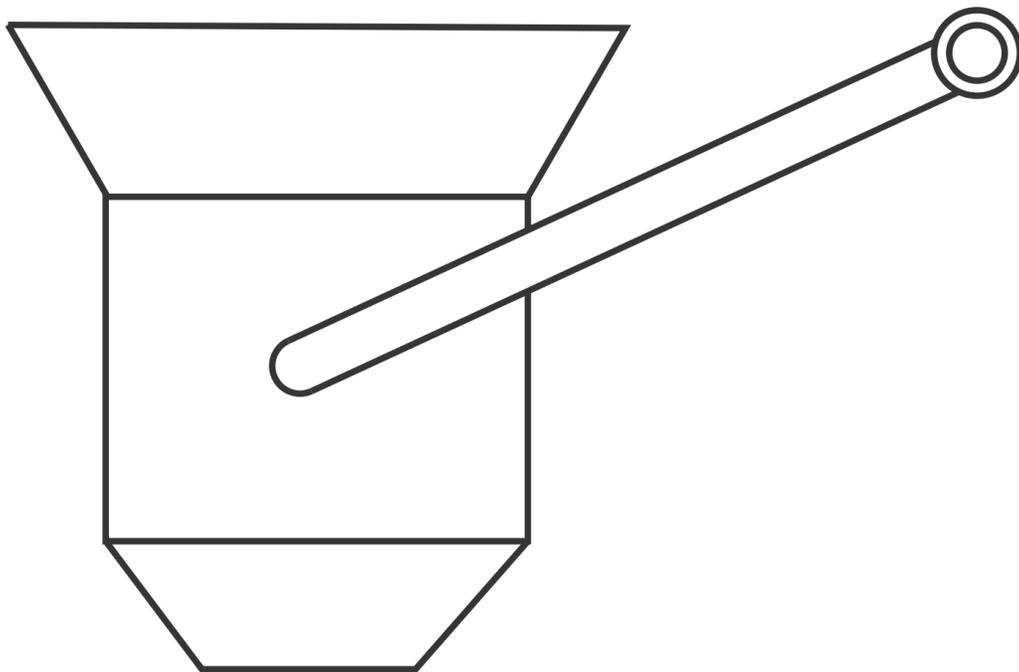
Otra alternativa posible para generar el movimiento necesario para reducir el material es utilizar el motor sólo para el sistema de extrusión, y hacer el sistema de reducción operar sin motor mediante los movimientos del usuario.

Figura 7

Alternativa 2 de fuente de movimiento para el sistema de reducción del material.

Operado mediante manivela.

Manivela



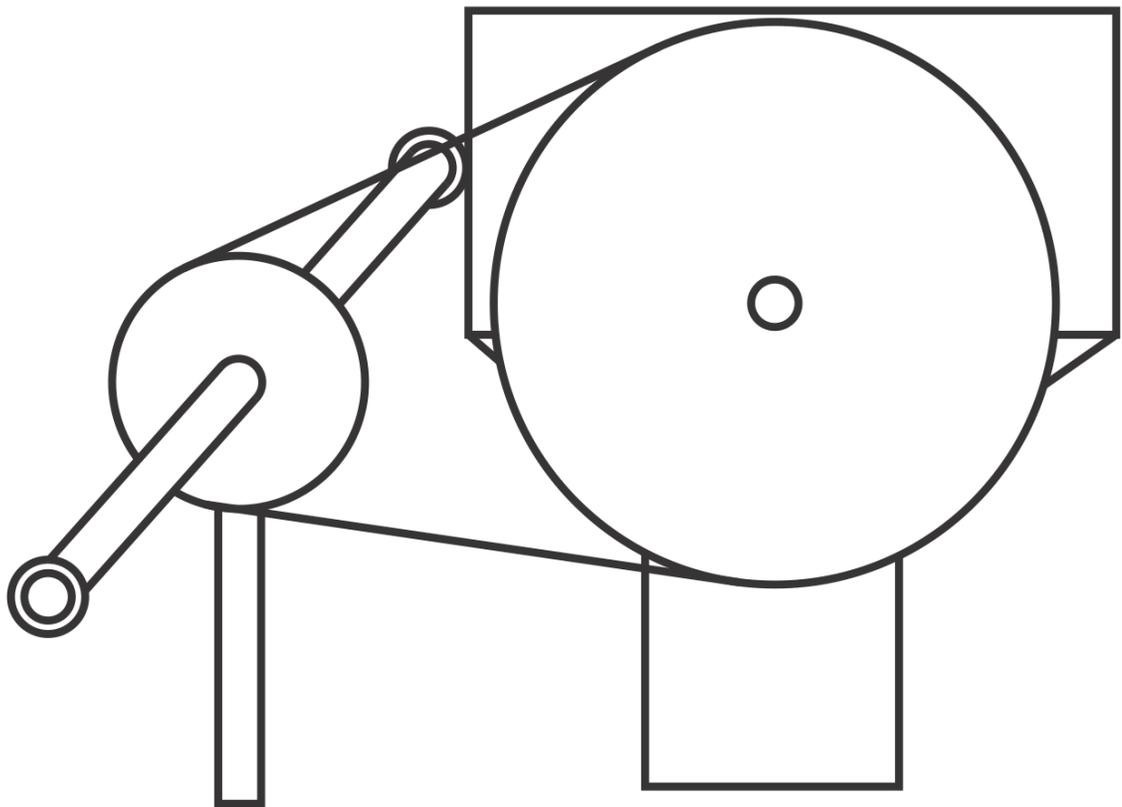
La alternativa 2 (Figura 7) se plantea como un sistema operado por medio de una manivela. Esta idea tiene como ventaja su facilidad de construcción, pero su operación puede ser tediosa y físicamente agotadora para el usuario, y la manivela posiblemente tenga que ser bastante larga para generar el torque necesario para reducir el material, haciendo el diseño menos compacto.

Figura 8

Alternativa 3 de fuente de movimiento para el sistema de reducción del material.

Operado por pedales de mano.

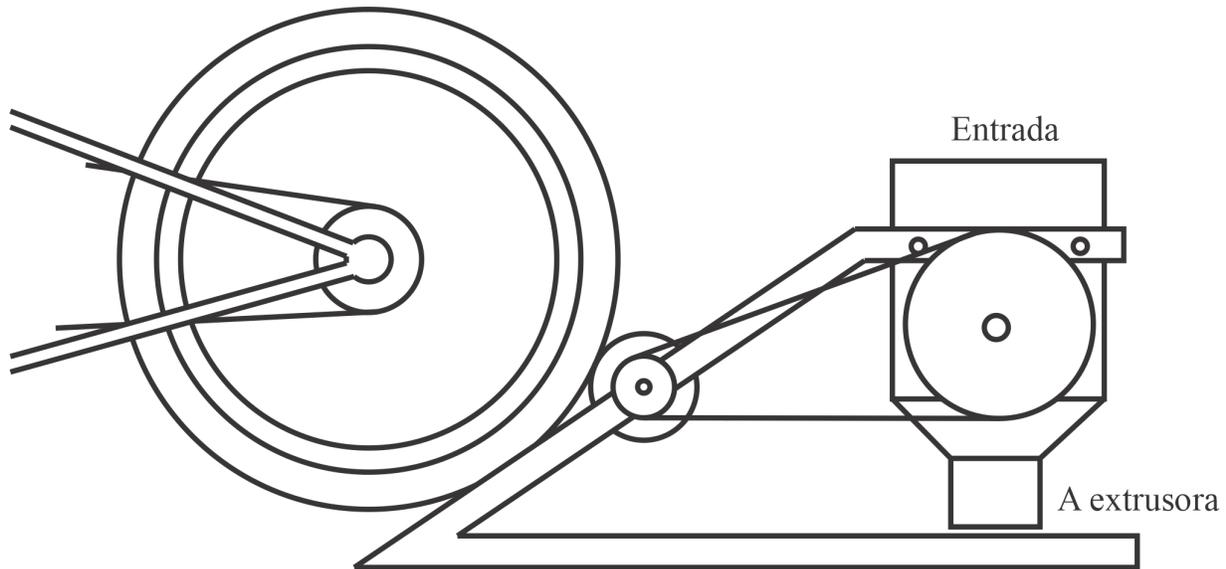
Pedales para mano



Esta alternativa (Figura 8) puede ser menos físicamente agotadora que una manivela, y producir un movimiento más continuo, traduciéndose en una mayor velocidad de procesamiento. Sin embargo, sigue teniendo la desventaja de ser menos compacto que simplemente usar un motor.

Figura 9

Alternativa 4 de fuente de movimiento para sistema de reducción de material. Sistema acoplable a bicicleta.



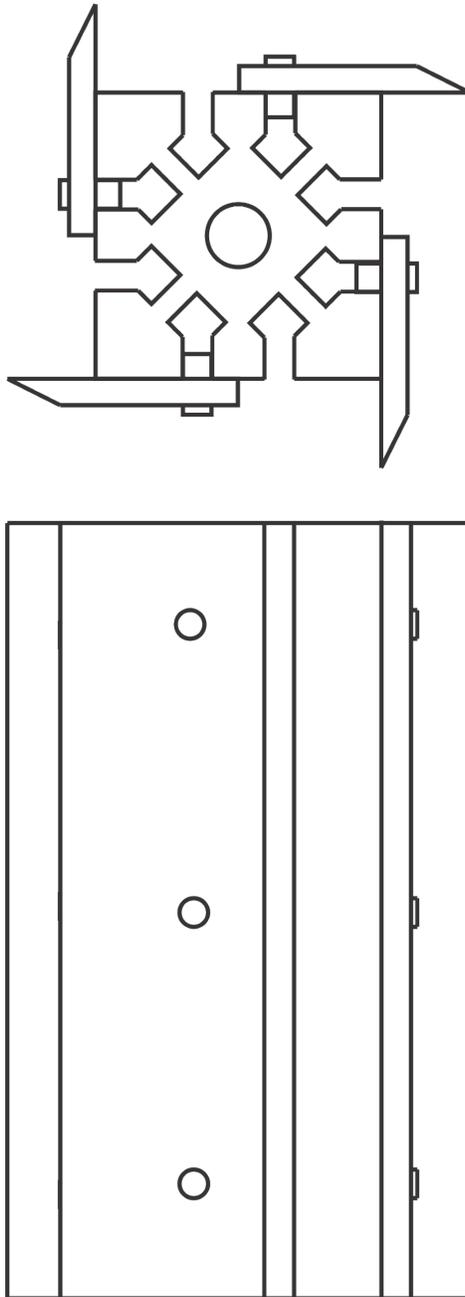
Por último, se plantea un diseño que permite acoplar una bicicleta al sistema. Esta alternativa (Figura 9) sería más rápida y menos trabajosa para el usuario que las dos anteriores, podría tener valor agregado como máquina de ejercicio. Sin embargo, tiene las desventajas de requerir demasiado espacio disponible, y requerir que el usuario tenga una bicicleta a su disposición.

Las alternativas 2, 3, y 4 tienen la ventaja de aumentar la sostenibilidad del sistema al permitir eliminar el consumo energético de la reducción del material, y de permitir accionar el sistema de reducción independientemente de la extrusora. Mientras tanto, la alternativa 1 tiene un diseño más compacto, pero implica un mayor consumo energético y sólo permitiría accionar la reductora de material y la extrusora al mismo tiempo.

Para la reducción del material, se contemplaron dos alternativas de eje de trituración.

Figura 10

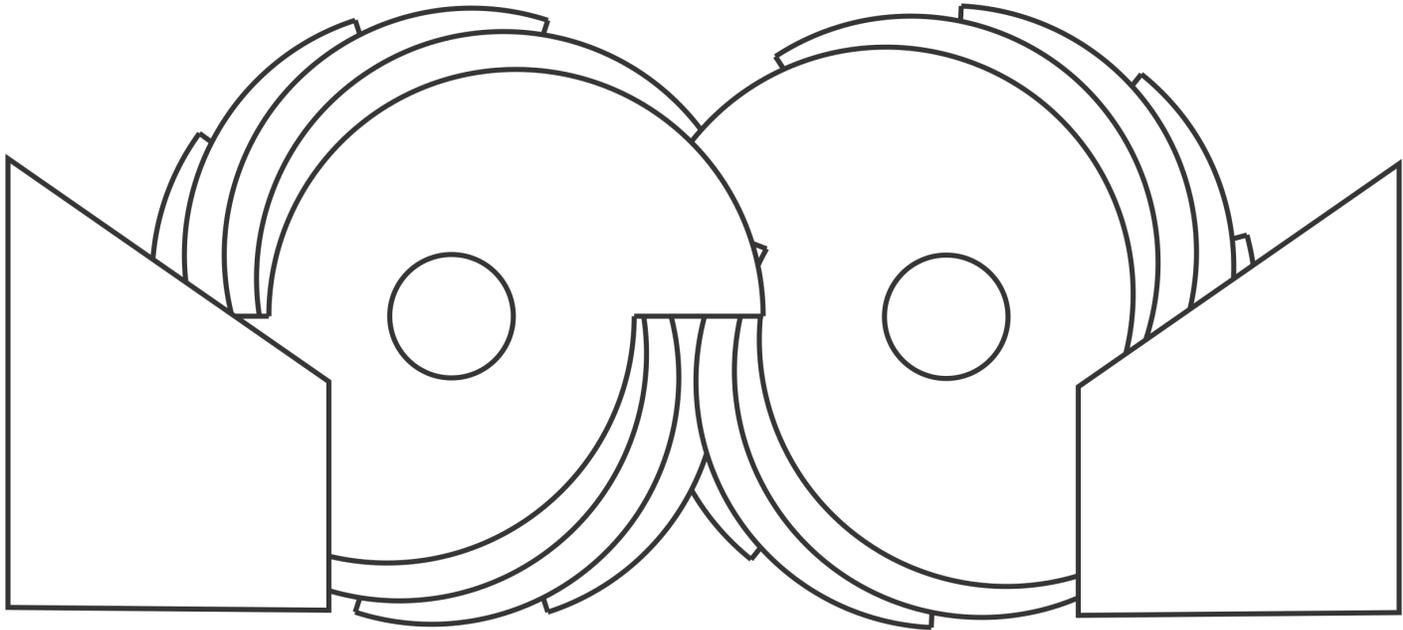
Alternativa 1 de sistema de reducción



La alternativa 1 (Figura 10) presenta un eje de trituración formado por cuatro cuchillas de acero inoxidable colocadas en cuatro caras de una viga cuadrada mediante tornillos, las cuales crean una fuerza cortante con la ayuda de dos cuchillas ubicadas a cada lado.

Figura 11

Alternativa 2 de sistema de reducción



La segunda alternativa para el sistema de reducción (Figura 11) tiene dos árboles de triturado formados por cuchillas de acero inoxidable encarradas horizontalmente.

La primera alternativa requiere un menor torque que la segunda, pero una mayor velocidad, mientras que la segunda requiere un mayor torque pero una velocidad más baja.

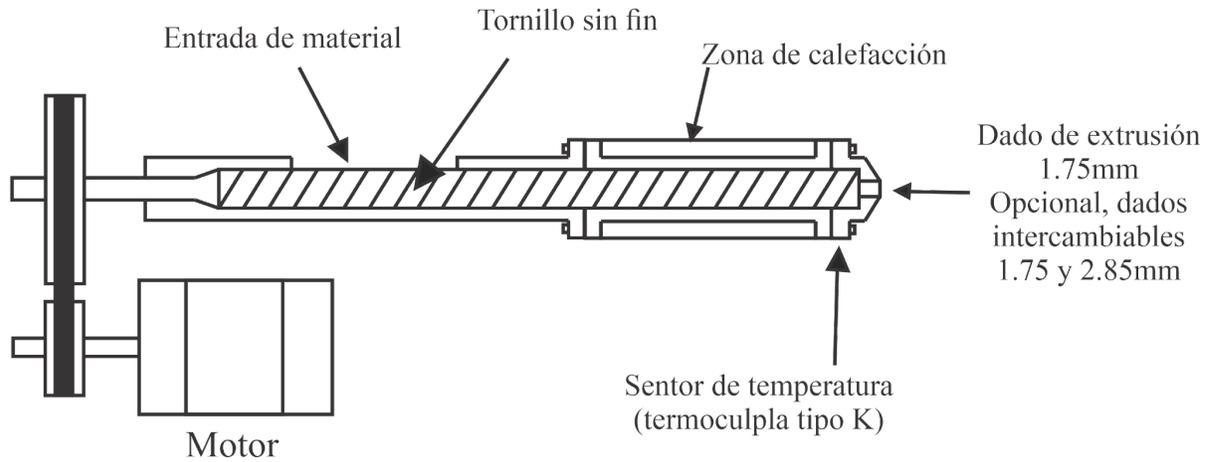
Tras ser reducido, el material pasa al área de extrusión, la cual tiene la función de recibir el material, y extruirlo en forma de hilo mediante la aplicación de calor y presión.

Figura 12

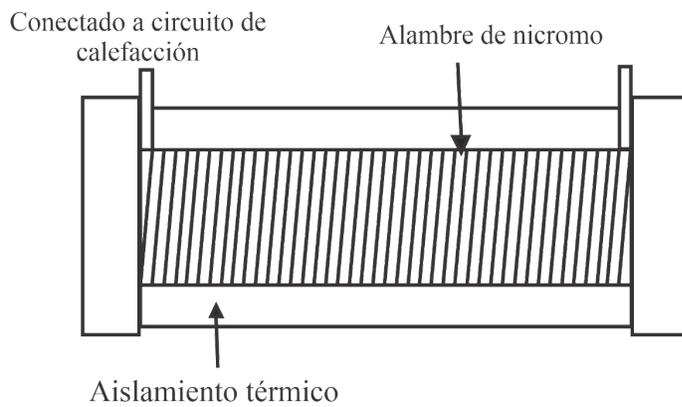
Boceto del sistema de extrusión, alternativa 1

Extrusora

Basada en Recyclebot v 2.3



Sección de calefacción



Opciones de aislamiento térmico:

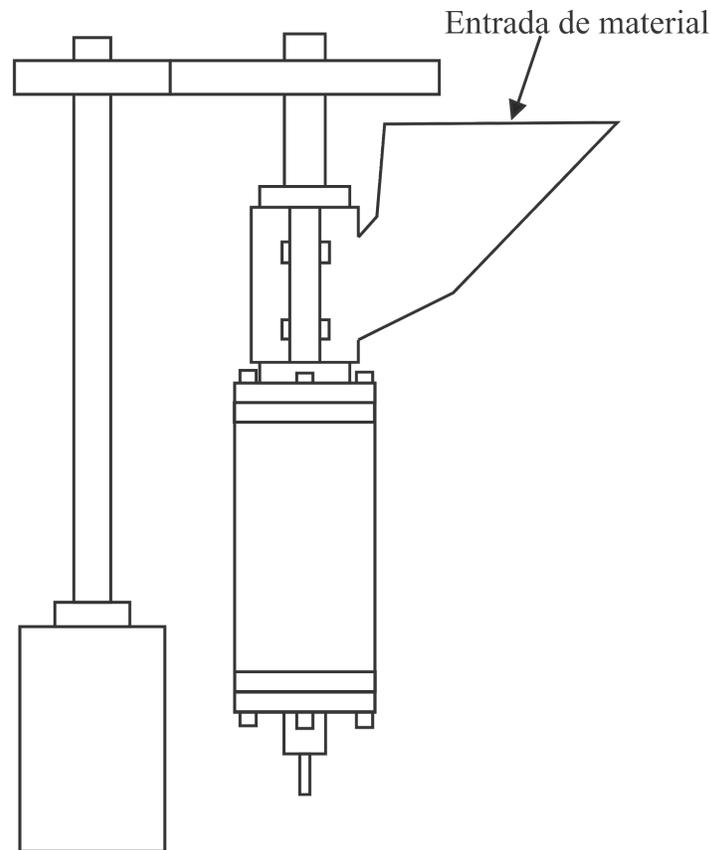
- Cemento refractario
- Fibra de vidrio
- Cerámica

Cuentas de cerámica en el alambre de nicromo?



Figura 13

Boceto del sistema de extrusión, alternativa 2



Basado en el diseño del proyecto open-source Recyclebot v2.3 , este planteamiento para la sección de extrusión cuenta con un tornillo sin fin conectado a un motor mediante un sistema de correas, el cual se encargará de aplicar presión y mover el material por el interior del tubo de acero hacia el dado de extrusión, atravesando el área de calefacción. El área de calefacción consiste en una bobina de alambre de nicromo aislada con cerámica o cemento refractario. Entre el área de calefacción y el dado de extrusión irá ubicada la punta de una termocupla tipo K, que servirá como medidor de temperatura.

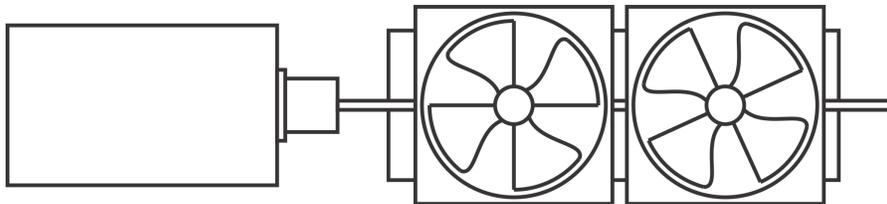
La alternativa 1 (Figura 12) muestra este diseño en una configuración horizontal, la cual es usada por la mayoría de extrusoras tanto industriales como comerciales. La alternativa 2 (Figura 13)

muestra este diseño con una configuración vertical. Esta segunda configuración tiene como ventaja un ahorro energético, ya que la acción de la gravedad significa que es necesaria menos potencia del motor para obtener el mismo flujo de material, y un menor requerimiento de espacio en términos de área de base. Sin embargo, al tener un centro de masa más alto y un área de base más pequeña, esta alternativa tiene menor estabilidad estructural que la alternativa 1, la cual tiene un centro de masa bajo y una mayor área de base.

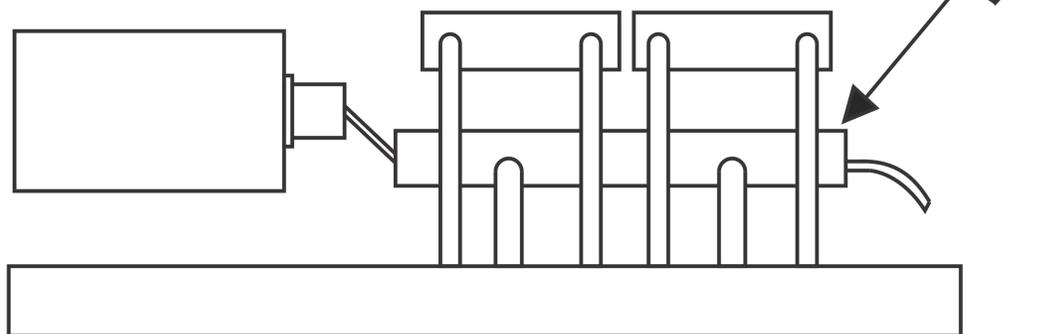
Figura 14

Sistema de enfriado del filamento

Vista superior



Vista lateral



La figura 14 muestra el planteamiento para un sistema de enfriamiento del material, consistente en un riel con forma en V que se encarga de guiar el filamento para hacerlo pasar bajo una serie de ventiladores de computadora que se encargan de enfriar y endurecerlo.

3.3 Selección de ideas

3.3.1 Cálculos de potencia para determinar la viabilidad del uso de motor, manivela, pedales, o pedaleras de mano

Antes de realizar la selección de las alternativas para el cumplimiento de las otras funciones, es importante hacer estimaciones de los cálculos de fuerza para el sistema de reducción del material, ya que estos cálculos pueden descartar por completo las alternativas 2, 3 y 4 planteadas para la fuente de poder para la trituración del material, si se determina que se requiere más torque del que es viable producir por acción humana.

Como se estableció antes, la resistencia al corte del PET es de 58.6 MPa, siendo este el esfuerzo cortante que tendría que aplicarse al PET para cortarlo. Sin embargo, es recomendable asumir un factor de seguridad de 2, por lo cual se asumirá que debe aplicarse un esfuerzo cortante de 117.2 MPa.

De acuerdo a la ecuación:

$$(1) \quad \sigma = F_c/A$$

Donde σ es el esfuerzo cortante aplicado, F_c es la fuerza de corte aplicada, y A es el área transversal del material a cortar, se puede despejar para calcular la fuerza cortante que se necesita aplicar:

$$(2) \quad F_c = \sigma * A$$

En este caso, σ es igual a 117.2 MPa, o N/mm². El área transversal de corte puede simplificarse como el grosor del material a cortar por la longitud del diente de corte. Dado que el principal material a reducir con este sistema son las botellas de PET, cuyo grosor de pared es, en promedio, 0.010 a 0.020 pulgadas[33], es decir 0.254 a 0.408 mm, se tomará 0.408 mm como

grosor del material, y se asignará al diente de corte una longitud provisional de 10mm para el propósito de estos cálculos, resultando así en un área transversal de 4.08 mm^2 .

Reemplazando en la ecuación (2):

$$F_c = 117.2 \text{ N/mm}^2 * 4.08 \text{ mm}^2$$

$$F_c = 468.8 \text{ N}$$

Con una longitud de diente de corte de 10mm, debe ejercerse una fuerza de 468.8 Newton para realizar el corte del material. Suponiendo una distancia provisional de 10 cm desde el diente de corte hasta el centro del eje de corte, se puede realizar el cálculo de torque:

$$(3) \quad T = F * d$$

$$T = 468.8 \text{ N} * 0.05 \text{ m}$$

$$T = 46.8 \text{ Nm}$$

Para encontrar que el eje de corte necesita un torque de 46.8 Nm. En caso de que se decida potenciar el ensamble con un motor. Tomando este valor como torque de salida y asumiendo una eficiencia del 75% en la transmisión del torque, se puede encontrar el torque de entrada:

$$(4) \quad E = (T_{\text{salida}} / T_{\text{entrada}}) * 100\%$$

$$75\% = (46.8 \text{ Nm} / T_{\text{entrada}}) * 100\%$$

$$T_{\text{entrada}} = 46.8 \text{ Nm} * 100\% / 75\%$$

$$T_{\text{entrada}} = 62.4 \text{ Nm}$$

La fuente de poder, ya sea un motor o un mecanismo accionado por el usuario, debe ser capaz de proveer un torque de al menos 62.4 Nm. En el caso de un motor, asumiendo que se quiere una velocidad de 50 rpm, es posible encontrar la potencia mínima necesaria:

$$(5) \quad P = 0.105 * T * \theta$$

$$P = 0.105 * 62.4 \text{ Nm} * 50 \text{ rpm}$$

$$P = 326.7 \text{ w}$$

Se requiere un motor de al menos 326.7 watts de potencia para realizar el corte del material, sin embargo la potencia requerida puede ser reducida a costo de una menor velocidad angular.

En el caso de un mecanismo accionado por el usuario, asumiendo que la manivela o pedal que el usuario usará para aplicar el torque de entrada tiene una longitud de 30 cm, es posible calcular la fuerza que el usuario tendría que aplicar utilizando la ecuación 3 una vez más:

$$T = F * d$$

$$62.4 \text{ Nm} = F * 0.3 \text{ m}$$

$$F = 62.4 \text{ Nm} / 0.3 \text{ m}$$

$$F = 208 \text{ N}$$

Se requeriría al usuario ejercer una fuerza de 208 Newton para realizar el corte del material. Aunque es posible para un ser humano ejercer esta fuerza, es una fuerza que tendrá que ejercer de manera continua. Dado que las fuerzas continuas ejercidas por la mano no deberían exceder los 45 Newton [34], el torque máximo que usuario podría ejercer con una manivela de 30 cm se puede calcular como:

$$T = 45 \text{ N} * 0.3 \text{ m}$$

$$T = 13.5 \text{ Nm}$$

Este valor no es el suficiente para realizar el corte del material. Sin embargo, es posible encontrar formas de alcanzar el torque requerido. Una posible forma es aumentando el tamaño de la manivela, pero una manivela demasiado grande no es posible ya que se requiere un diseño lo más compacto posible. Una forma mucho más apropiada es el uso de un sistema de reducción de

la velocidad angular, ya sea ruedas de fricción, sistema polea-correa, o engranajes. En cualquiera de estos casos, la relación entre torques con respecto a los radios de las ruedas o engranajes puede calcularse como:

$$(6) \quad T1 / r1 = T2 / r2$$

Reemplazando los torques en esta ecuación:

$$13.5 \text{ Nm} / r1 = 62.4 \text{ Nm} / r2$$

$$r2 / r1 = 62.4 \text{ Nm} / 13.5 \text{ Nm}$$

$$r2 / r1 = 4.62$$

Es posible alcanzar el torque necesario para el corte del material mediante el uso de un sistema de engranajes, polea-correa, o ruedas de fricción con una proporción entre radios de 4.62, a costo de una reducción de la velocidad angular en la misma proporción.

Ya que se ha establecido que es posible realizar el corte del material utilizando tanto un motor como la fuerza del usuario como fuente de poder, puede procederse a la selección de alternativas de diseño con el conocimiento de que no se debe descartar ninguna de estas alternativas.

3.3.2 Comparación por matriz de Pugh

Combinando las alternativas dadas para cada parte del sistema, se crearon seis posibilidades para el diseño del dispositivo, documentadas en la siguiente tabla.

Tabla 4

Alternativas de diseño del dispositivo

Alternativa	A	B	C	D	E	F
Entrada de material	Tolva	Tolva	Cámara cilíndrica	Cámara cilíndrica	Cámara cilíndrica	Tolva
Fuente de movimiento para trituradora	Motor	Pedal de mano	Motor	Bicicleta	Manivela	Manivela
Tipo de trituradora	Golpe, alta velocidad	Cuchillas de disco, baja velocidad	Cuchillas de disco, baja velocidad	Golpe, alta velocidad	Cuchillas de disco, baja velocidad	Cuchillas de disco, baja velocidad
Configuración de extrusora	Horizontal	Vertical	Vertical	Horizontal	Horizontal	Vertical

Estas alternativas se compararon mediante el uso de una matriz de Pugh ponderada [35], la cual es una herramienta utilizada para la comparación y selección rápida de conceptos de diseño. Para aplicar esta herramienta, primero se debe crear una lista de criterios que se utilizarán para comparar las alternativas. Estos tienen que ser criterios sobre los cuales sea posible realizar estimaciones debidamente basadas en las características definidas para cada alternativa. Los criterios elegidos para comparar las seis alternativas planteadas fueron:

- Compacidad (aprovechamiento de espacio)
- Ahorro de energía
- Seguridad del usuario
- Nivel de ruido
- Facilidad de uso

Tras escoger estos criterios, se procede a asignar un peso a cada uno de ellos de acuerdo a la importancia relativa que se tendrá en cuenta para la ponderación, procediendo después a puntuar cada alternativa de 1 a 5 en cada uno de los criterios. De acuerdo a los pros y contras mencionadas para cada idea de cada parte del sistema, así como de datos adicionales consultados, y asumiendo que todas las alternativas usen componentes y diseños idénticos para los sistemas que tienen en común (mismo motor para el sistema de extrusión, mismas dimensiones del tambor de extrusión, mismos ventiladores para el sistema de enfriamiento, etc.) se podría concluir que:

- **Ahorro de energía:** Asumiendo que el motor usado para la trituradora sea un motor de 2.2kW [36], el proceso de triturado en las alternativas A y C, en las cuales este proceso es potenciado a motor, tendría un consumo eléctrico de 2.2 kWh por hora de triturado. Las alternativas B, D, E y F, en las cuales el proceso de triturado es potenciado por pedales de

mano, bicicleta, y manivela y por lo tanto no tendría consumo energético, tendrían por lo tanto un ahorro de energía de 2.2 kWh con respecto a las alternativas A y C (asumiendo que el consumo energético del proceso de extrusión sea igual para todas las alternativas).

- **Ahorro de espacio:** Dado que la alternativa D plantea una bicicleta como fuente de energía para la trituradora, y que unas dimensiones típicas para una bicicleta pueden ser 0.457 m de ancho y 1.727 m de largo [37], esta requería 0.789 m² de espacio de planta para esta fuente de energía, además del espacio ocupado por la trituradora y la extrusora en sí. Las alternativas A y C plantean un motor trifásico como fuente de energía para el proceso de triturado. Asumiendo que este motor tenga 17.5 cm de ancho por 36.7cm de largo, las cuales son dimensiones típicas para un motor trifásico de 2.2 kW [38], estas alternativas requerirían 0.064 m² de espacio de planta para acomodar el motor, además del espacio ocupado por el resto del sistema. La alternativa B plantea el uso de pedales de mano para potenciar la trituradora. Asumiendo una longitud de 15cm desde el centro hasta el eje de cada pedal, y un ancho de 20cm para la pedalera, este sistema requeriría 0.06 m² de espacio de planta, además del espacio que ocupe el resto del sistema, pero además requeriría que esta área tuviera un espacio vertical libre de al menos 30 cm para que el movimiento de los pedales no se vea interrumpido. Las alternativas E y F plantean el uso de una manivela para potenciar la trituradora. Asumiendo una longitud de 35 cm para la manivela y una longitud de 10 cm para la manija de la manivela, esta solución requeriría 0.07 m² de área de planta para esta fuente de energía, pero también requeriría que esta área tuviera un espacio vertical libre de al menos 70 cm para que el movimiento de la manivela no se vea interrumpido. Además de esto, las alternativas B, C, y F tendrían una ligera ventaja en cuanto a ahorro de espacio con respecto a las alternativas A, B, y E,

ya que al configurar el mismo tambor de extrusión de manera vertical, este requeriría un menor espacio de planta que el mismo tambor de extrusión ubicado de manera horizontal. Sin embargo, esta ventaja sería relativamente pequeña comparada con el área de planta total de cada alternativa.

- **Seguridad del usuario:** Las alternativas C, D, y E, las cuales plantean la entrada de material como un sistema de cilindros rotativos los cuales permiten el ingreso del material al área de triturado pero impiden el ingreso de la mano del usuario, representan una clara ventaja en seguridad del usuario con respecto a las alternativas A, B, y F, en las cuales las cuchillas se encuentran expuestas durante el proceso de triturado. Las alternativas B, C y F, las cuales plantean un sistema de extrusión configurado de manera vertical, pueden además presentar un riesgo adicional a la seguridad del usuario al tener la extrusora un centro de masa más elevado que en las alternativas A, C, y E, las cuales plantean una extrusora horizontal, lo que haría la extrusora más propensa a volcarse o caer de lado.
- **Nivel de Ruido:** Al igual que en el punto anterior, dado que se asume que se está utilizando el mismo tambor de extrusión y motor para la extrusora en todas las alternativas, el factor crítico para comparar las alternativas sería el ruido producido durante el proceso de triturado. Para las alternativas A y C se asume un motor trifásico de 2.2 Kw como fuente de energía para la trituradora. Los motores de inducción tienden a generar ruido de tres fuentes: ruido magnético por la vibración del centro del motor debido a fuerzas electromagnéticas, ruido mecánico producido por los rodamientos, y ruido producido por el sistema de ventilación [39]. 2.2 kW equivalen aproximadamente a 3 hp. Dependiendo de diferentes factores, un motor de inducción de 3hp puede tener un

nivel de ruido de entre 53.1 dBA y los 81.1 dBA [39]. Este es un nivel de ruido que no estaría presente en las alternativas B, D, E y F, las cuales utilizan fuentes pedales de mano, una bicicleta, y una manivela como fuentes de potencia para la trituradora. Además, el tipo de cuchilla de triturado planteado para las alternativas A y D se trata de una trituradora mono-árbol diseñada para funcionar por impacto [27], mientras que el tipo de cuchilla planteado para las alternativas B, C, E y F se trataría de una trituradora de dos árboles diseñada para funcionar por cizallamiento [25], lo que confiere a las alternativas B, C, E y F una ventaja con respecto al nivel de ruido, ya que el triturado por impacto es más ruidoso que el triturado por cizallamiento.

- **Facilidad de uso:** Debido a sus características, el proceso de uso de la alternativa A tendría 10 pasos (ubicar material en la tolva de la trituradora, encender trituradora, esperar a que el material esté triturado, apagar trituradora, transferir material triturado a la extrusora, encender extrusora, configurar temperatura, configurar velocidad de extrusión, esperar a que el filamento esté extruido, apagar extrusora), el de la alternativa B tendría 8 pasos (ubicar material en la tolva de la trituradora, operar pedales de mano hasta que el material esté triturado, transferir material triturado a la extrusora, encender extrusora, configurar temperatura, configurar velocidad de extrusión, esperar a que el filamento esté extruido, apagar extrusora), el de de la alternativa C tendría 11 pasos (ubicar material en el cilindro de entrada, girar cilindro de entrada para dejar el material pasar a la trituradora, encender trituradora, esperar a que el material esté triturado, apagar trituradora, transferir material triturado a la extrusora, encender extrusora, configurar temperatura, configurar velocidad de extrusión, esperar a que el filamento esté extruido, apagar extrusora), el de la alternativa D tendría 9 pasos (ubicar material en el cilindro de

entrada, girar cilindro de entrada para dejar el material pasar a la trituradora, operar bicicleta hasta que el material esté triturado, transferir material triturado a la extrusora, encender extrusora, configurar temperatura, configurar velocidad de extrusión, esperar a que el filamento esté extruido, apagar extrusora), el de la alternativa E tendría 9 pasos (ubicar material en el cilindro de entrada, girar cilindro de entrada para dejar el material pasar a la trituradora, operar manivela hasta que el material esté triturado, transferir material triturado a la extrusora, encender extrusora, configurar temperatura, configurar velocidad de extrusión, esperar a que el filamento esté extruido, apagar extrusora), y el de la alternativa F tendría 8 pasos (ubicar material en la tolva de la trituradora, operar manivela hasta que el material esté triturado, transferir material triturado a la extrusora, encender extrusora, configurar temperatura, configurar velocidad de extrusión, esperar a que el filamento esté extruido, apagar extrusora). Es decir, el tipo de sistema de entrada le confiere a las alternativas A, B y F (las cuales lo plantean como una tolva) una ligera ventaja con respecto a facilidad de uso, ya que el uso de el sistema de entrada de cilindros rotativos en las alternativas C, D, y E requiere un paso extra (girar el cilindro de entrada para permitir al material pasar a la trituradora); mientras que el tipo de sistema de potencia para el triturado da a las alternativas A y C (las cuales lo plantean como un motor) una gran ventaja en cuanto a facilidad de uso, ya que para el proceso de triturado estas alternativas requieren tres pasos discretos (encender la trituradora, esperar a que el material esté triturado, apagar la trituradora), mientras que para este mismo proceso las alternativas B, D, E y F requieren un esfuerzo continuo por parte del usuario para suministrar potencia a la trituradora.

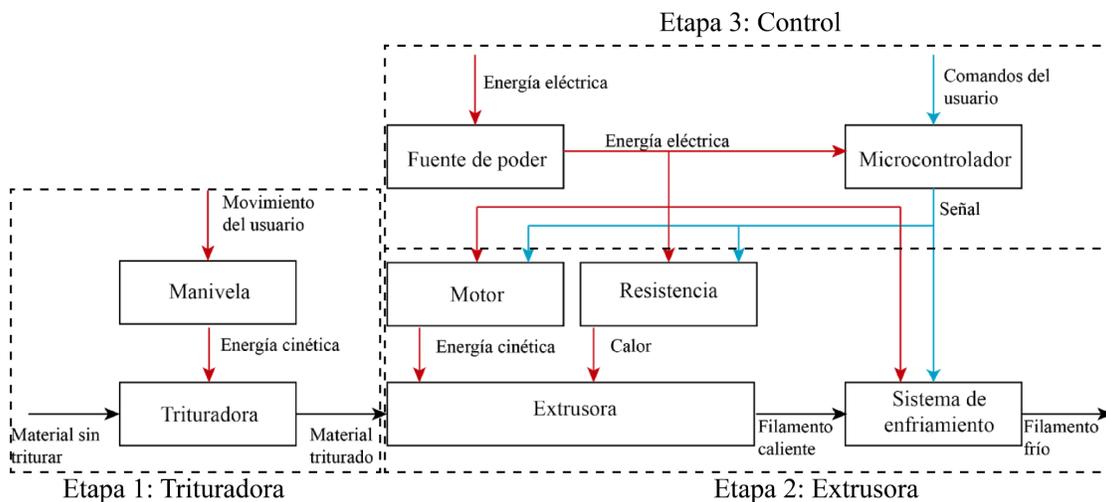
Tabla 5: Resultados de matriz de Pugh Ponderada

Criterio	Peso del criterio	A	B	C	D	E	F
Ahorro de espacio	7	4	3	5	1	3	4
Ahorro de energía	7	1	5	1	5	5	5
Seguridad del usuario	10	2	2	2	4	4	2
Nivel de ruido	6	1	4	4	2	4	4
Facilidad de uso	6	4	3	4	3	3	4
Suma ponderada		2,361	3,278	3,06	3,111	3,833	3,64
Ranking		6	3	5	4	1	2

Dada la comparación realizada mediante esta matriz de Pugh ponderada, se concluye que la alternativa E es la alternativa elegida con la cual se pasará a la fase de diseño de detalle. La figura 15 muestra la alternativa E representada como un diagrama de bloques.

Figura 15

Diagrama de bloques de la alternativa elegida



3.4. Diseño de detalle

3.4.1 Diseño de las etapas de triturado y extrusión

El sistema se plantea como un combo de trituradora y extrusora de escritorio. Una gran proporción de las partes del diseño final planteado fueron diseñadas para su producción mediante

prototipado 3D. Esto facilita la reproducción y reemplazo de estas partes en el caso de presentarse daños, y cuenta con el beneficio adicional de aumentar la circularidad del sistema al expandir sobre el concepto de la RepRapable recyclebot: Al ser producidas mediante prototipado 3D, en caso de presentarse daños a estas partes, estas pueden ser procesadas convertidas en filamento reciclado una vez sean reemplazadas, lo cual cierra el bucle de su ciclo de vida al permitir utilizarlas para producir otros modelos por prototipado una vez ya no sean útiles para el sistema. El resto de sus partes fueron escogidas en base a su disponibilidad comercial para su fácil reemplazo. Esto, junto al uso de partes impresas en 3D, busca facilitar las reparaciones y extender el ciclo del sistema.

El sistema tiene unas dimensiones de 50 cm * 30cm * 32 cm y un peso de 8.34 Kg. Se pueden apreciar renders del diseño planteado en las figuras 16 a 20, y vistas en las explosionadas en las figuras 21 y 22.

Figura 16

Render del diseño CAD del sistema

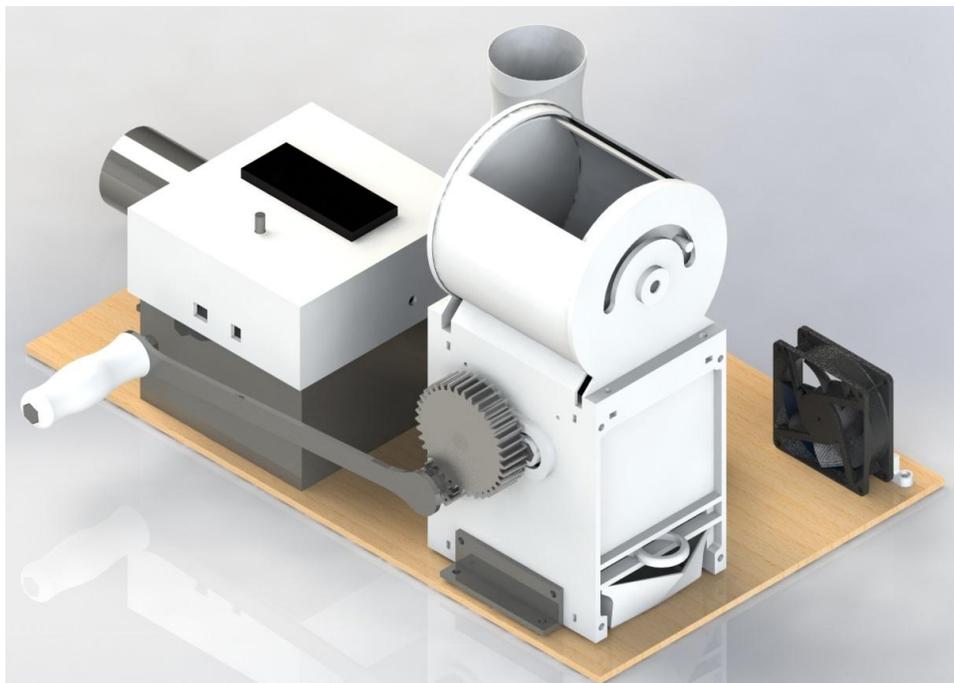


Figura 17

Detalle de las cuchillas de triturado y la boquilla de extrusión

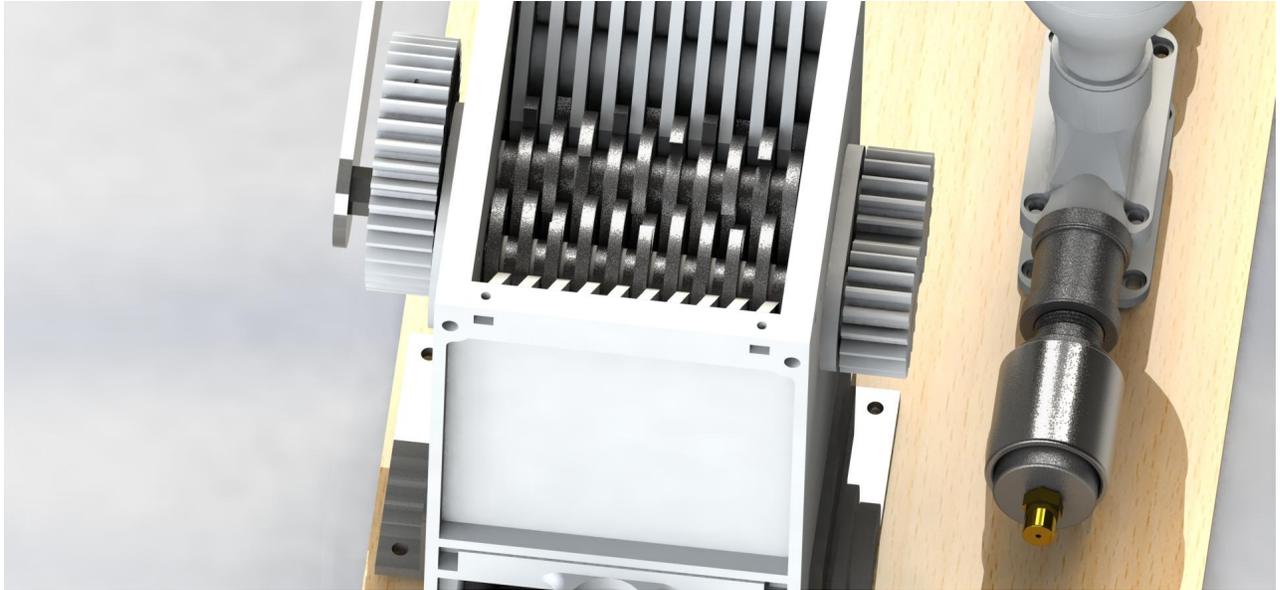


Figura 18

Detalle de la rejilla de tamizaje del material



Figura 19

Detalle de la taza de recolección del material triturado

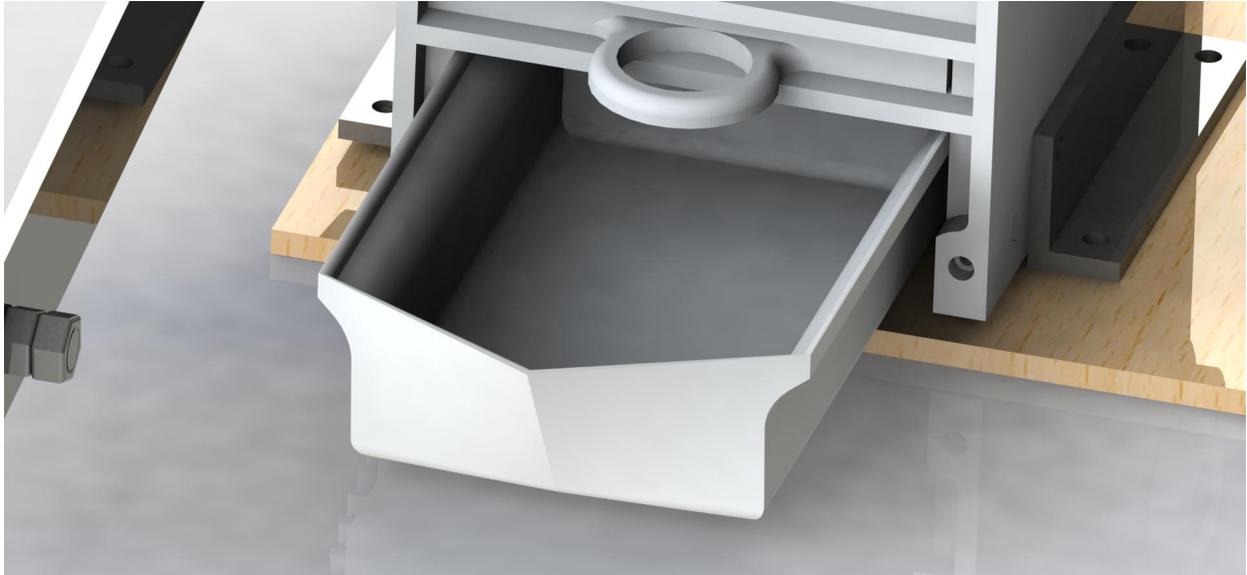


Figura 20

Vista de sección del tambor de extrusión

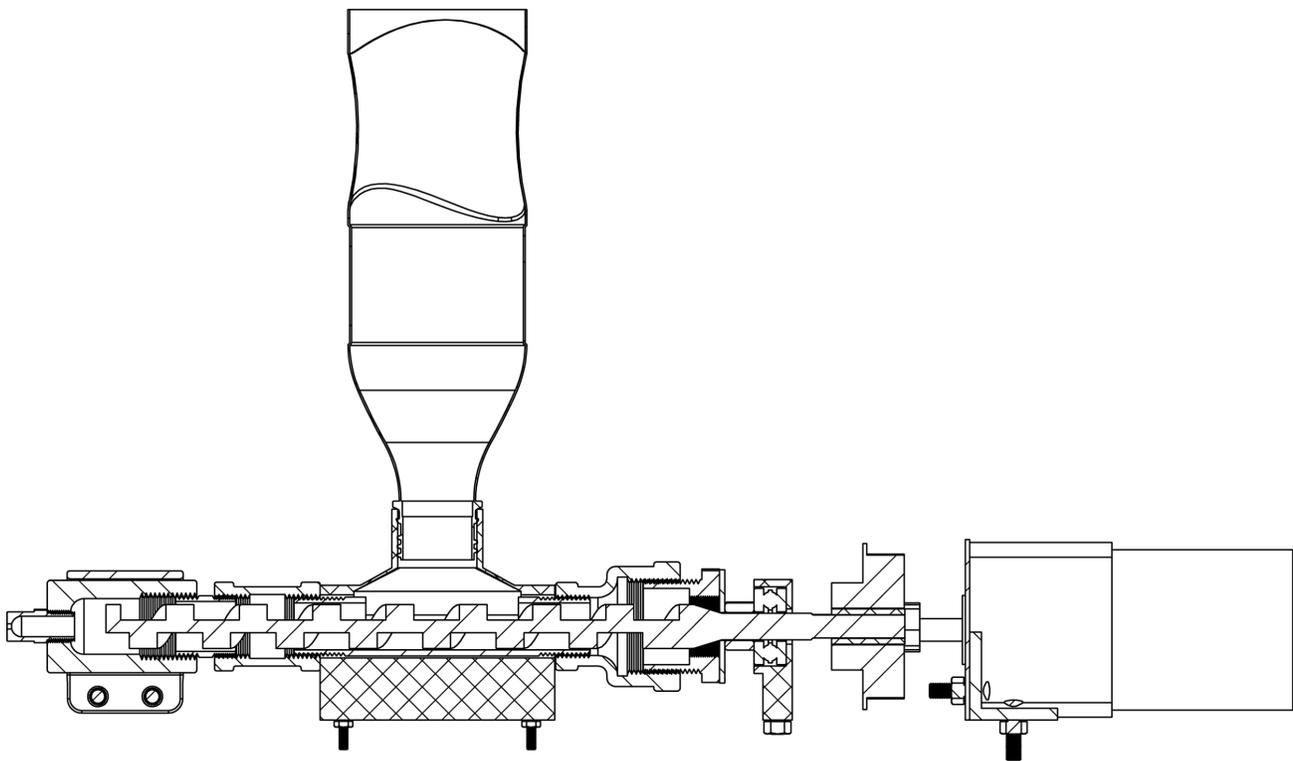
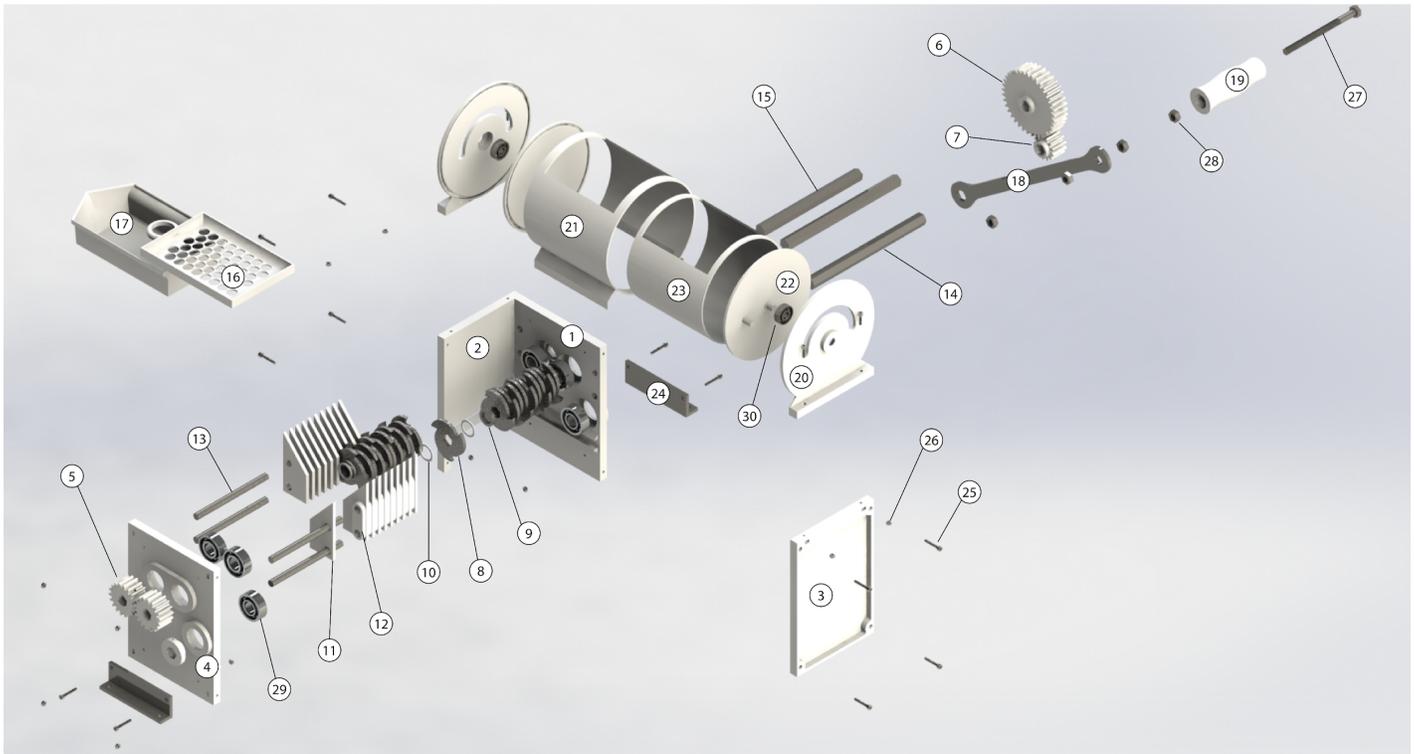


Figura 21

Vista explosionada del sistema de trituración



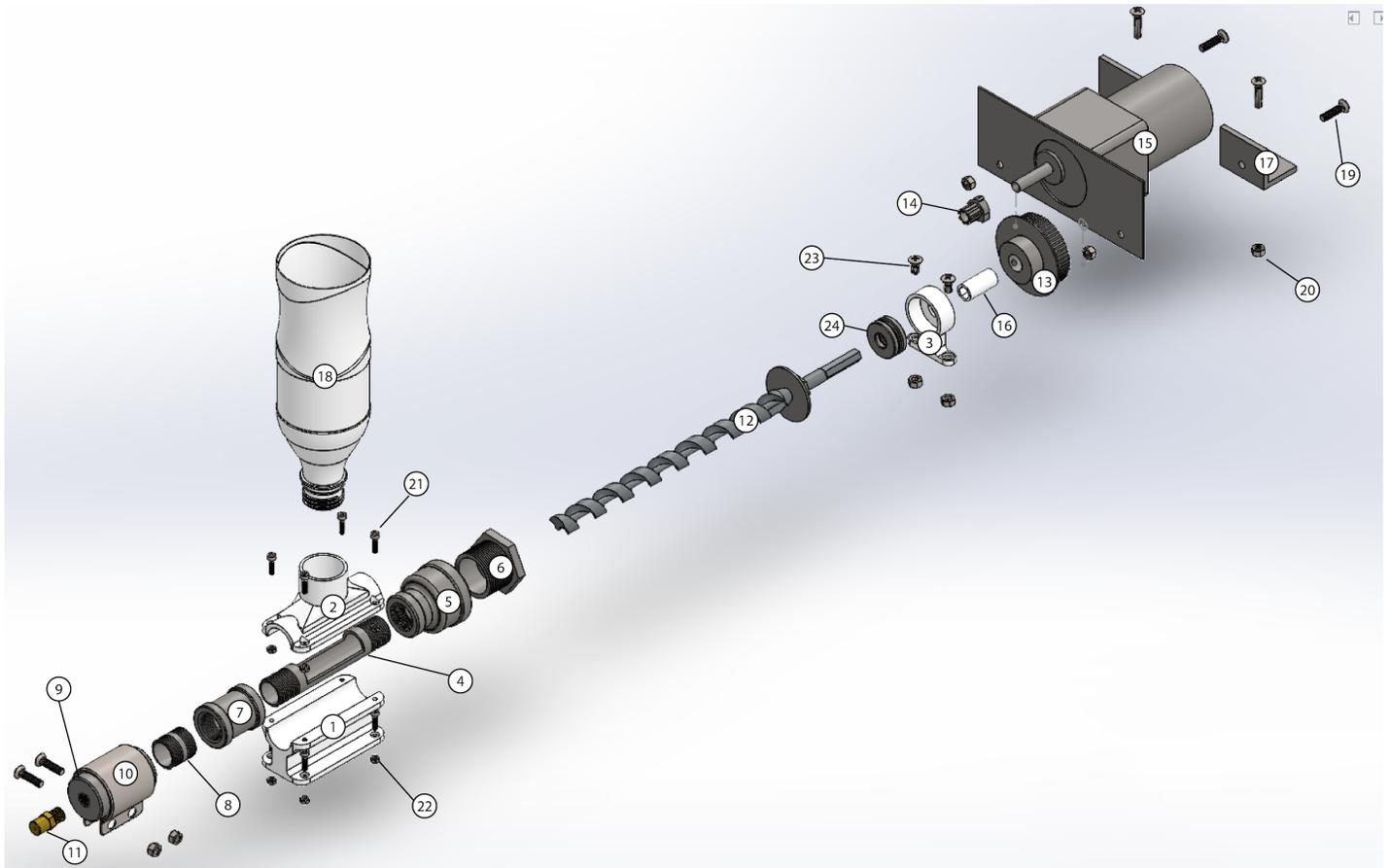
Piezas:

1. Pared de trituradora 1
2. Pared de trituradora 2
3. Pared de trituradora 3
4. Pared de trituradora 4
5. Engranaje mediano (x2)
6. Engranaje grande
7. Engranaje pequeño
8. Cuchilla de triturado (x20)
9. Separador de las cuchillas 1 (x20)

10. Arandela separadora (x20)
11. Separador de las cuchillas 2 (x20)
12. Separador de las cuchillas 3 (x20)
13. Varilla redonda x4
14. Eje hexagonal largo (x2)
15. Eje hexagonal corto
16. Rejilla de tamizaje
17. Taza de almacenamiento del material
18. Manivela
19. Mango manivela
20. Soporte sistema de entrada de material (x2)
21. Cilindro exterior sistema de entrada de material
22. Tapa cilindro interior sistema de entrada de material
23. Cilindro interior sistema de entrada de material
24. Ángulo de soporte trituradora
25. Tornillo M3*15mm (x16)
26. Tuerca M3 (x20)
27. Tornillo $\frac{3}{8}$ "*4" (x1)
28. Tuerca $\frac{3}{8}$ " (x4)
29. Rodamiento radial de bolas 6202
30. Rodamiento radial de bolas 608zz

Figura 22

Vista explosionada del sistema de extrusión



Partes:

1. Base del tambor de extrusión
2. Tapa del tambor de extrusión
3. Base del eje del tornillo de extrusión
4. Entrada del tambor de extrusión
5. Conector del tambor de extrusión 1
6. Entrada del tornillo de extrusión
7. Conector del tambor de extrusión 2

8. Conector del tambor de extrusión 3
9. Sección de calentamiento
10. Calentador (resistencia de nicromo, 110V AC, 150w)
11. Boquilla de extrusión
12. Tornillo de extrusión
13. Polea tornillo
14. Polea motor
15. Motorreductor (24V DC, 25W)
16. Acople polea del tornillo
17. Ángulo de soporte del motor
18. Embudo (botella de PET sin fondo)
19. Tornillo M5*15mm (x4)
20. Tuerca M5 (x8)
21. Tornillo M3*10mm
22. Tuerca M3
23. Tornillo M5*10mm (x2)
24. Rodamiento de empuje lineal 51200

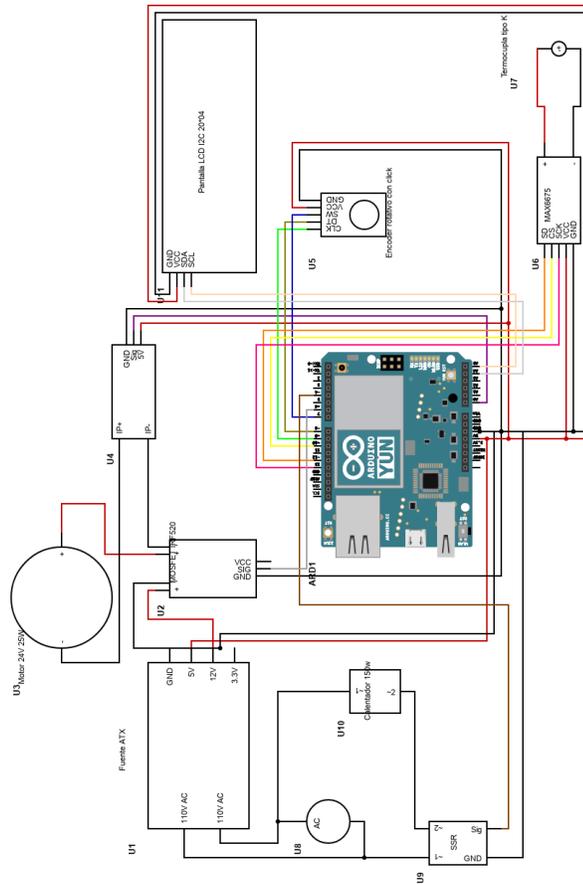
3.4.2 Diseño de la etapa de control electrónico

El proyecto se encuentra controlado por un microcontrolador Arduino Uno alimentado a 5 voltios por una fuente de alimentación ATX. Además del motor y la resistencia listados en las secciones anteriores, utiliza un módulo MAX6675 con termocupla tipo K para la medición de temperatura, un relé de estado sólido (SSR) para y un módulo MOSFET ISF520N para el control por ancho de pulso de temperatura y velocidad respectivamente, un módulo ACS712 para la

medición de la corriente del motor, y un encoder rotativo con pulsador y una pantalla LCD I2C 20x04 para la interfaz de usuario. Un esquema del montaje de estos elementos se presenta en la figura 23.

Figura 23

Esquema de control electrónico de la extrusora



El controlador Arduino está programado con una versión modificada del código de la extrusora open-source Felfil Evo [40]. Se ha modificado la calibración del algoritmo PID de este código para un mejor control de temperatura, ya que los valores por defecto de las constantes k_p , k_i y k_d produjeron oscilaciones de temperatura demasiado grandes que podrían afectar la calidad de la extrusión.

3.5. Lista de Materiales

Tabla 6

Lista de materiales

Tornillería			
Pieza	Cantidad	Precio unidad	Costo
Tornillo m3*15mm	28	400	11200
Tornillo m5*15mm	4	500	2000
Tornillo m5*10mm	2	400	800
Tuerca m3	28	200	5600
Tuerca m5	6	200	1200
Tornillo 3/8" x 4"	1	3300	3300
Tuerca 3/8	4	500	2000
Rodamiento de bolas 6202	6	4000	24000
Rodamiento de bolas 608	2	2500	5000
Rodamiento de empuje lineal 51200	1	10000	10000
Total tornillería:			65100

Piezas producidas por prototipado 3D FDM						
Pieza	Cantidad	Horas impresión	Material (g)	Precio hora	Precio gramo	Costo
Pared trituradora 1	1	15	110	1100	115	29150
Pared trituradora 2	1	15	110	1100	115	29150
Pared trituradora 3	1	12	70	1100	115	21250
Pared trituradora 4	1	12	70	1100	115	21250
Engranaje mediano	2	1,5	15	1100	115	6750
Engranaje pequeño	1	0,75	9	1100	115	1860
Engranaje grande	1	6	50	1100	115	12350
Separador cuchillas 1	20	0,4	6	1100	115	22600
Separador cuchillas 2	20	0,2	4	1100	115	13600
Arandela separadora	20	0,1	2	1100	115	6800

Mango manivela	1	3	37	1100	115	7555
Soporte sistema de entrada	2	6	50	1100	115	24700
Cilindro exterior entrada	1	10	30	1100	115	14450
Cilindro interior entrada	1	9	30	1100	115	13350
Tapa cilindro interior	2	5	15	1100	115	14450
Base tambor de extrusión	1	5	46	1100	115	10790
Base del tornillo de extrusión	1	2	16	1100	115	4040
Tapa del tambor de extrusión	1	2	19	1100	115	4385
Taza almacenamiento material	1	8	66	1100	115	16390
Rejilla tamizado material	1	3,5	37	1100	115	8105
Carcasa electrónica	1	12	60	1100	115	20100
Tapa carcasa electrónica	1	12	60	1100	115	20100
Total prototipado 3D						323175

Corte láser en acero inoxidable 4mm

Pieza	Cantidad	Precio unidad	Costo
Cuchillas	20	2400	48000
Arandelas	20	947	18940
Manivela	1	10800	10800
Total			77740

Electrónica

Pieza	Cantidad	Precio unidad	Costo
Arduino Uno /Arduino Yun	1	30000	30000
Módulo MOSFET IRF 540N	1	6000	6000
MAX6675 con termocupla tipo K	1	14184	14184
Relé de estado sólido	1	34000	34000
Pantalla LCD I2C	1	13000	13000
Motorreductor DC 24v 40w	1	40000	40000

Resistencia AC 110v 150w	1	15700	15700
Ventilador DC 12v 8*8	1	10700	10700
Encoder rotativo con click	1	3200	3200
Fuente ATX	1	40000	40000
Total electrónica			206784

Ferretería y otros			
Pieza	Cantidad	Precio	Costo
Broca para madera 5/8"	1	30000	30000
Niple galvanizado roscado 1/2" * 13cm	1	4000	4000
Conector tubo 1/2"	1	2000	2000
Sección de calentamiento (torneado en aluminio)	1	20000	20000
Bushing 1"	1	2800	2800
Reductor bushing 1/2" a 1"	1	5000	5000
Boquilla de bronce	2	3500	7000
MDF 30cmx50cmx9mm	1	20000	20000
Correa dentada paso 5mm, 45 dientes	1	10000	10000
Rueda dentada paso 5mm 30 dientes	1	5000	5000
Rueda dentada paso 5mm 8 dientes	1	4000	4000
Total ferretería y otros			109800

Costo total del sistema: \$782.599

4. Construcción, pruebas y resultados

4.1. Construcción del modelo

Las figuras 24 a 27 muestran el modelo construido para las pruebas de verificación del sistema. aunque no fue planteado como un prototipo final, fue necesario utilizar los materiales reales planteados, ya que estos están estrechamente relacionados con el funcionamiento correcto del sistema.

Figura 24

Módulo de triturado



Figura 25

Detalle de las cuchillas



Figura 26

Módulo de extrusión



Figura 27

Montaje del sistema con electrónica



4.2. Pruebas de verificación

Prueba de eficiencia de la trituradora:

Propósito: No todo el material que pasa por la trituradora tiene el tamaño adecuado para realizar la extrusión. Tras realizar el proceso de triturado, el material pasa por una malla de tamizado que separa los pellets que tienen el tamaño adecuado de los que no, y estos últimos deben pasar a ser triturados una vez más. Con esta prueba se busca conocer el porcentaje del material que alcanza el tamaño adecuado durante el primer proceso de triturado.

Variables independientes:

1. Peso inicial del material P_i (kg)
2. Material (PET, ABS, PLA)

Variables dependientes:

1. Peso el material que pasó la malla de tamizado P_1 (kg)
2. Pero del material que no pesó la malla del tamizado P_2 (kg)
3. Porcentaje de eficiencia de la trituradora E (%)

Materiales e implementos:

1. Trituradora
2. Material a triturar
3. Gramera
4. Recipientes o bolsas para almacenar el material antes y después del triturado

Protocolo:

1. Pesar en la gramera 100 gramos del material a triturar.
2. Introducir el material en la trituradora.
3. Triturar el material.

4. Retirar la taza de almacenaje de material, transferir material a un recipiente o bolsa.
5. Retirar la rejilla de tamizado, transferir material a un recipiente o bolsa.
6. Pesar el material que pasó a la taza de almacenaje.
7. Pesar el material que se quedó en la rejilla de tamizado.
8. Calcular la eficiencia de la trituradora como $E = P1*100\%/Pi$, donde Pi es el peso inicial del material y $P1$ es el peso del material que pasó la malla de tamizaje.

Prueba de calidad de la extrusión

Propósito: El filamento para prototipado 3D tiene que mantener un diámetro con una variación relativamente baja para que la impresión se realice adecuadamente. La temperatura y la velocidad de extrusión pueden afectar la constancia del diámetro del filamento, con esta prueba se busca probar este efecto.

Variables independientes:

1. Material (PET, ABS, PLA)
2. Temperatura de extrusión T (°C)
3. Velocidad de extrusión V (RPM)
4. Boquilla (1.75mm, 3mm)

Variables dependientes:

1. Diámetro promedio D (mm)
2. Desviación estándar σ (mm)

Materiales e implementos:

1. Extrusora
2. Material a extruir

3. Calibrador con precisión de 0.01mm

Protocolo:

1. Introducir el material en la extrusora.
2. Encender la extrusora y esperar a que alcance la temperatura de fusión del material
3. Comenzar la extrusión.
4. Usar la extrusora para producir nueve muestras de filamento utilizando diferentes temperaturas y velocidades de extrusión.
5. Tomar 10 mediciones del diámetro de cada muestra utilizando el calibrador.
6. Calcular el diámetro promedio y desviación estándar de cada muestra.

4.3. Reporte y análisis de pruebas de verificación

Reporte de prueba de eficiencia de la trituradora

Figura 28

Pesado del material inicial en muestra de ABS



Figura 29

Pesado del material que no pasó el tamizado en muestra de ABS

**Figura 30**

Comparación del material que pasó y que no pasó el tamizado en la anterior muestra de ABS



Se realizaron seis pruebas de trituración, cada una con 100 gramos de material, usando tanto botellas de PET como sobrantes de impresiones en ABS, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 7

Resultados de la prueba de eficiencia del triturado:

	Material	Peso de material de entrada (g)	Peso del material que pasó el tamizaje (g)	Peso del material que no pasó el tamizaje (g)	Eficiencia del triturado	Eficiencia promedio
Muestra 1	PET	100	64	36	64%	
Muestra 2	PET	100	61	39	61%	64%
Muestra 3	PET	100	66	34	66%	
Muestra 4	ABS	100	80	20	80%	
Muestra 5	ABS	100	78	22	78%	80%
Muestra 6	ABS	100	81	19	81%	

Interpretación:

La trituradora muestra una eficiencia mucho mayor al triturar piezas impresas en ABS que al triturar botellas de PET, ya que con las muestras de PET procesadas, alrededor de un tercio del material tuvo que ser reintroducido a la trituradora para alcanzar una dimensión adecuada para ser introducido a la extrusora. Es posible que esto sea causado por el hecho de que las piezas creadas mediante manufactura aditiva tienden a tener zonas de falla naturales entre cada capa, lo cual hace más fácil reducir su tamaño mediante trituración, y también al hecho de que el PET posee un módulo de elasticidad más elevado, lo que hace que las piezas tiendan a deformarse más antes de romperse. Sin embargo, cabe resaltar que

Observaciones adicionales:

- Durante el proceso de triturado, los engranajes experimentaron un desgaste mucho mayor que el que se esperaba dado el factor de seguridad estimado en las simulaciones CAD, posiblemente debido a haber sido producidos mediante manufactura aditiva, lo cual crea

zonas débiles entre capa y capa. Una posible solución podría ser modificar el diseño de los engranajes para aumentar su longitud, distribuyendo la fuerza entre un área mayor, o simplemente no incluir los engranajes entre las piezas replicables mediante manufactura aditiva y buscar un nuevo método de producción.

Figura 31

Desgaste del engranaje



Reporte de pruebas de extrusión

Existió un inconveniente imprevisto a la hora de realizar las pruebas de extrusión, ya que durante el montaje del modelo funcional, la correa dentada sufrió un daño accidental y acabó reventando. Ya que fue imposible conseguir un reemplazo a tiempo para realizar la experimentación, se optó por la solución provisional de acoplar el motorreductor directamente al eje del tornillo de extrusión. Sin embargo, esto resultó en velocidades de extrusión mucho mayores a las planeadas originalmente, lo que acabó afectando los resultados de la extrusión. Se realizaron 5 pruebas de extrusión de PET, sin embargo este aspecto del proyecto requiere un estudio mayor con velocidades de extrusión más adecuadas para obtener datos más relevantes.

Figura 32

Muestras de filamento de PET obtenidas



Figura 33

Filamento en proceso de extrusión



Tabla 8

Resultados de la prueba de extrusión

Muestra	Material	Diámetro boquilla (mm)	Velocidad del tornillo (RPM)	Temperatura (°C)	Muestra calibre (mm)										Calibre promedio (mm)	Desviación estándar (mm)
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Muestra 1	PET	1,75	50	240	0,6	0,7	0,5	0,6	0,55	0,6	0,45	0,75	0,4	0,5	0,565	0,10814085
Muestra 2	PET	1,75	50	250	0,3	0,55	0,6	0,5	0,75	0,8	0,5	0,6	0,5	0,55	0,565	0,1395429
Muestra 3	PET	1,75	40	240	0,7	0,75	0,3	0,5	0,75	0,8	0,7	0,85	0,7	0,8	0,685	0,16507574
Muestra 4	PET	1,75	40	250	0,55	0,5	0,6	0,75	0,7	0,55	0,65	0,65	0,5	0,45	0,59	0,09660918
Muestra 5	PET	1,75	30	240	1,1	0,5	0,55	0,7	0,9	1	0,6	0,95	0,5	0,8	0,76	0,22085692
Muestra 6	PET	1,75	30	250	0,9	1	0,7	1,05	0,7	0,75	0,8	0,55	0,6	0,9	0,795	0,16574747
Muestra 7	ABS	1,75	50	220	1,5	1,65	1,5	1,75	1,2	1,8	1,65	1,7	1,75	1,5	1,6	0,179505494

Solo fue posible realizar una prueba de extrusión usando ABS como material, en la cual se redujo la temperatura de extrusión a 220°C para ser acorde . Este material, sin embargo, mostró un comportamiento mucho mejor que las muestras de PET tomadas, ya que su diámetro promedio fue más cercano al filamento estándar de 1.75mm disponible comercialmente, y se observó un aspecto más liso y libre de imperfecciones. Una posible causa es que su temperatura de extrusión más baja haya resultado en un mejor enfriamiento, lo cual impidió su deformación después de ser extruido. En las figuras 34 y 35 se comparan las muestras de filamento de PET y ABS obtenidas con una muestra de filamento polimérico comercial de 1.75mm.

Figura 34

Comparación de muestras de filamento de PET obtenidas contra filamento comercial



En esta comparación de algunas muestras del filamento de PET obtenido (gris) y filamento polimérico comercial (azul) se evidencia un diámetro mucho menor, y numerosas imperfecciones que causan un diámetro inconsistente.

Figura 35

Comparación de muestra de filamento de ABS obtenido contra filamento comercial



En esta comparación entre la muestra del filamento de ABS obtenido (gris) y filamento polimérico comercial (azul) se evidencia que, a pesar de ciertas imperfecciones, el diámetro y acabado de la muestra son bastante cercanos a los de la muestra comercial

Aunque se puede concluir que la alta velocidad de giro del tornillo contribuyó a que el filamento no cumpliera con los requerimientos establecidos en la tabla PRS en cuanto a su diámetro y calidad, no se puede determinar aún si los hubiera cumplido de haberse realizado la prueba utilizando el mecanismo de reducción de velocidad por polea y correa planteado originalmente. Sin embargo, es posible que una menor velocidad de extrusión, una mejor zona de enfriamiento, y la presencia de un sistema tensionador que aplique una tensión constante al filamento a medida que se extruya probablemente contribuirían a un mejor comportamiento del material y a un producto final más consistente con estándares comerciales, particularmente en el caso de las muestras de PET.

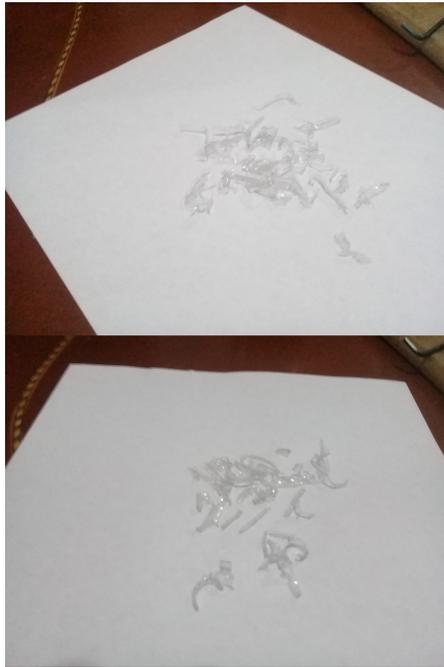
Observaciones adicionales:

- Se detectó un factor imprevisto al realizar la extrusión: los pellets, al ser producidos mediante triturado de las botellas de PET, toman la forma de escamas planas y de un espesor reducido, tienden a ocupar el espacio vacío existente entre tambor y la cresta del tornillo de extrusión, frenando su movimiento rotacional. Una posible solución podría ser reemplazar el tambor de extrusión para reducir esta tolerancia e impedir que los pellets puedan entrar en este espacio vacío. Sin embargo esto requeriría la producción de un tubo personalizado no disponible comercialmente. La realización de un proceso de grageado (consistente en exponer los pellets a temperaturas en su zona de transición vítrea pero inferiores a su temperatura de fusión para inducir la deformación) entre el proceso de triturado y la extrusión resultó ser efectivo en la eliminación de este problema (Figura

36). Es posible que este proceso intermedio necesite ser incorporado al sistema para garantizar la correcta extrusión.

Figura 36

Muestra de pellets de PET antes y después del proceso de grageado



Durante el proceso de grageado, los pellets se curvan y su espesor aumenta a causa de la deformación térmica, impidiendo que se atasquen entre el tornillo y el tambor de extrusión.

4.4. Cambios de diseño basados en los resultados de las pruebas

Dado que al momento de realizar las pruebas se encontraron factores a mejorar, tanto inherentes al diseño del sistema como debidos a factores externos, se pudieron identificar mejoras necesarias por realizar. Se reparó el sistema de reducción de velocidad de la extrusora (Figura 37), se modificó el sistema de enfriamiento (Figura 38), y se agregó un sistema tensor para regular el diámetro de extrusión mediante un motor paso a paso controlado por un potenciómetro (Figura 39). Además de esto, se agregó un sistema de aislamiento térmico.

Figura 37

Sistema de reducción de velocidad reimplimentado



Figura 38

Mejora de la zona de enfriamiento



Figura 39

Adición de un tensor para aplicar tensión constante al filamento



4.5. Pruebas subsecuentes

Con los cambios realizados, se procedió a realizar nuevas pruebas de extrusión en ABS y PET, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 9

Resultados de pruebas de extrusión con tensor

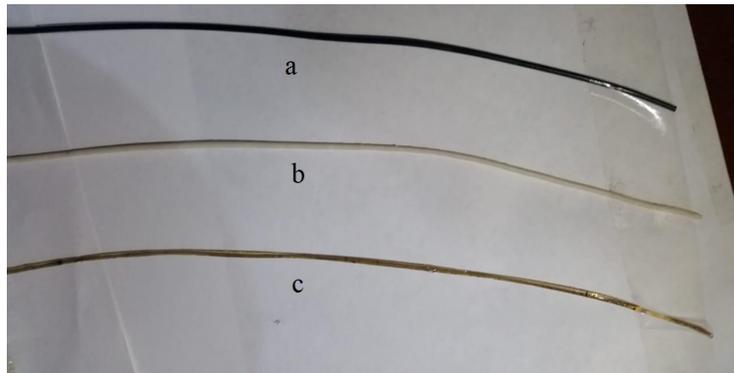
Muestra	Material	Diámetro boquilla (mm)	Velocidad del tornillo (RPM)	Temperatura (°C)	Muestra calibre (mm)										Promedio (mm)	Desviación estándar (mm)
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Muestra 1	PET	1,75	15	260	1,65	1,6	1,5	1,75	1,8	1,7	1,65	1,65	1,67	1,5	1,647	0,09592242
Muestra 2	ABS	1,75	15	260	1,7	1,55	1,8	1,75	1,6	1,8	1,7	1,65	1,8	1,6	1,695	0,09264628

A pesar de algunas imperfecciones (tales como burbujas de aire), el filamento de PET y ABS obtenido mostraron una mejora respecto a las pruebas anteriores tanto en cuanto al diámetro en sí como en cuanto a calidad y consistencia del diámetro.

La Figura 40 muestra la comparación de los filamentos de PET y ABS obtenidos comparados con una muestra de filamento de ABS comercial.

Figura 40

Comparación de muestras obtenidas



a) Filamento de ABS comercial. b) Filamento de ABS reciclado obtenido. c) Filamento de PET reciclado obtenido

Análisis:

La adición de un tensor y un mejor sistema de enfriamiento resultó en una mejora considerable en la calidad del filamento, así como su diámetro y la consistencia de este. Aunque el diámetro obtenido no fue exactamente igual al diámetro comercial, esta es una falla que es posible corregir en extrusiones posteriores variando la velocidad del puller para producir filamento con un diámetro ligeramente mayor. El filamento también presentó burbujas de aire ocasionalmente, lo cual indica la necesidad de un mejor proceso de secado antes de la extrusión. Además, se presentaron deformaciones ocasionales en el filamento por su tendencia a formar una curva catenaria entre la boquilla y el puller. Es posible que se requiera disminuir la distancia entre el puller y la boquilla para reducir este efecto.

También es posible que el hecho de que el diámetro siga siendo en promedio menor al esperado sea porque la boquilla se diseñó con un diámetro de 1.75mm, causando que el

filamento tenga un diámetro menor debido a la deformación térmica después de enfriarse. En la sección 4.6 se analiza la dilatación térmica del material para definir el cambio necesario al diámetro de la boquilla.

Posteriormente, se procedió a realizar una prueba de prototipado 3D con el filamento de PET obtenido, utilizando una impresora 3D ANET A8, con una boquilla de 0.4mm, temperatura de impresión de 260°C, superficie de impresión a 70°C, y velocidad de impresión de 15mm/s . Las figuras 9.2 y 9.3 muestran los resultados de las pruebas de impresión realizadas en PET.

Figura 41

Primera prueba de prototipado 3D con PET reciclado.



Figura 42

Segunda prueba de prototipado 3D con PET reciclado



Pieza impresa junto con moneda colombiana de 200 pesos para referencia de escala.

Análisis:

Las pruebas de prototipado realizadas muestran que el filamento de PET obtenido con el sistema diseñado a partir de botellas plásticas es viable para su uso en prototipado 3D, aunque, dado que el PET no es un material común en esta industria, es necesaria una mayor experimentación para encontrar los parámetros de impresión adecuados para obtener una mayor

4.6 Rediseño de la boquilla

El coeficiente de deformación térmica lineal (α) del PET es de $7 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ [29].

El cambio dimensional lineal debido a la dilatación térmica puede definirse de acuerdo a la ecuación 1.

$$(1) \quad \Delta L = L_1 \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

Donde ΔL es la variación de longitud, L_1 es la longitud inicial, Δt es la variación de temperatura, y α es el coeficiente de deformación térmica.

En Colombia la temperatura ambiente tiende a estar entre los 19°C y los 30°C . Dado que la temperatura de fusión del PET es de 260°C , Δt estaría entre los 230°C y los 241°C . Para

propósitos de estos cálculos, se tomará el promedio de 235.5°C, y se tratará 1.75mm a temperatura ambiente como la longitud inicial. Reemplazando en la ecuación se obtiene:

$$\Delta L = 1.75\text{mm} * (7 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}) * 235.5^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta L = 0.02884875\text{mm}$$

Por lo tanto, para que el filamento de PET tenga un diámetro de 1.75mm a temperatura ambiente, a 260°C debe tener un calibre de 1.7788 mm, el cual debe ser el diámetro del agujero de la boquilla.

Cabe resaltar, sin embargo, que el estiramiento debido a la velocidad del puller también tiene un efecto sobre el calibre del filamento, por lo cual el rediseño de la boquilla debe ir suplementado con un control preciso de la velocidad del puller para alcanzar el calibre del filamento comercial.

5. Conclusiones

- Tal como se evidencia en las secciones 3.1.1 a 3.1.6 y la Tabla 2, en este proyecto se utilizaron diferentes técnicas de recopilación de información para identificar y sintetizar las necesidades y deseos de los usuarios y las condiciones necesarias para el procesamiento del material y el funcionamiento básico del sistema.
- Se realizó un proceso de ideación en el cual se crearon alternativas para cada parte que interviene en la reducción y extrusión para convertir los desechos de PET en filamento para prototipado 3D, con los posibles pros y contras de cada alternativa. Posteriormente se realizó un proceso de selección de estas alternativas. Este proceso se evidencia en las secciones 3.3.1 a 3.3.2.
- Se desarrolló la alternativa seleccionada hasta llegar a un diseño detallado para un sistema capaz de realizar las funciones básicas de reducción y extrusión del material. El diseño fue planteado utilizando en su mayoría partes fáciles de obtener comercialmente, y partes reproducibles mediante prototipado 3D, con el fin de facilitar su reparación, extender su ciclo de vida, y aumentar su circularidad al permitir que las partes impresas en 3D sean recicladas y convertidas en filamento en caso de necesitar ser reemplazadas. Este diseño, su lista de partes, y sus componentes electrónicos se encuentran evidenciados en las secciones 3.4 a 3.5
- Tal como se evidencia en las secciones 4.1 a 4.3, se realizó la construcción del modelo planteado y se aplicaron pruebas para la verificación de su funcionamiento. Tras la realización de estas pruebas, se identificaron aspectos por mejorar que afectaron su funcionamiento y la viabilidad del filamento obtenido, lo cual llevó a la implementación

de cambios y mejoras en el diseño para mejorar su funcionamiento, tras los cuales fue posible obtener un filamento de mejor calidad el cual pudo ser utilizado en pruebas de prototipado (como se evidencia en las secciones 4.4 y 4.5). Este filamento resultó ser viable para su uso, pero se requiere mayor estudio de sus propiedades de impresión para mejorar la calidad de las impresiones realizadas con él.

- De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede concluir que mediante el proceso de diseño llevado a cabo se produjo un dispositivo viable para el aprovechamiento de los residuos de PET en forma de filamento para prototipado 3D.

6. Recomendaciones

Aunque las pruebas realizadas mostraron la viabilidad del uso del filamento obtenido para el prototipado 3D, aún es necesario mejorar su proceso de producción para obtener filamento de mayor calidad, por lo cual es necesario plantear algunos cambios posteriores al sistema para refinar más la producción del filamento.

Una mejora que es absolutamente necesaria es plantear un nuevo material o método de producción para los engranajes del módulo de trituración para que estos tengan una mayor resistencia y no se experimenten el desgaste evidencia en las pruebas.

Además de esta mejora indispensable, posibles mejoras adicionales incluyen:

- Reemplazar el sistema de control manual del tensor por un medidor electrónico de calibre que identifique el calibre del filamento extruido y ajuste automáticamente la velocidad del puller, para producir filamento de un calibre igual al comercial y con una menor variabilidad en su diámetro.
- Disminuir la distancia entre el tensor y la boquilla para reducir la deformación del filamento como producto de la gravedad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) Monterrosa H. Colombia podría aprovechar 40% de las toneladas de residuos que genera actualmente. Periódico La República. 10 de enero de 2019.
- 2) Noguera KM. Olivero J.T., Los Rellenos Sanitarios en Latinoamérica: Caso Colombiano. Revista Acad. Colomb. Ci. Exact. 2010; 34(132):347-356.
- 3) Ji LN. Study on Preparation Process and Properties of Polyethylene Terephthalate (PET). Appl. Mech. Mater. 2013;312:406–410.
- 4) Ministerio de Salud y Protección Social, Resolución 683 de 2012, 28 de marzo de 2012.
- 5) La impresión 3D consolida su crecimiento de cara a los próximos años [Internet]. Revista Digital IT Trends. 2019 [citado 27 diciembre 2019]. Disponible en: <https://www.ittrends.es/infraestructura/2019/01/la-impresion-3d-consolida-su-crecimiento-de-cara-a-los-proximos-anos>
- 6) La impresión 3D se abre mercado con fuerza en Colombia [Internet]. Cámara de Comercio de Bogotá. 2018 [citado 27 diciembre 2019]. Disponible en: <https://www.ccb.org.co/Clusters/Cluster-de-Comunicacion-Grafica/Noticias/2018/Agosto-2018/La-impresion-3D-se-abre-mercado-con-fuerza-en-Colombia>
- 7) Most used 3D printing technologies of 2017 and 2018 [Internet]. Statista. 2018 [citado 2 enero 2020]. Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies/>
- 8) Mitchell D. La paradoja de la industria plástica. Periódico El Espectador, edición 6 de agosto de 2019.

- 9) Turning old plastic into 3d printing filament is greener than conventional recycling [Internet]. 3Ders. 2014 [citado 2 enero 2020]. Disponible en: <http://www.3ders.org/articles/20140304-turning-old-plastic-into-3d-printer-filament-is-greener-than-conventional-recycling.html>
- 10) Pastori D. Colombia pierde 2 billones anuales por no reciclar desechos plásticos. Periódico El Heraldo, edición 10 de junio de 2019.
- 11) En Colombia solo se recicla el 7% del plástico, Diario Occidente, 1 de julio de 2019.
- 12) Departamento Nacional de Planeación. Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos. Bogotá D.C.; 2016. p. 46.
- 13) Proyecto "Hacia el reconocimiento y la institucionalización del reciclaje inclusivo en Colombia" [Internet]. Minvivienda. 2019 [citado 23 diciembre 2019]. Disponible en: <https://www.minvivienda.gov.co/node/24562>
- 14) What Is 'Maker Culture,' And How Can You Put It To Work? [Internet]. Forbes. 2015 [citado 15 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.forbes.com/sites/williamcraig/2015/02/27/what-is-maker-culture-and-how-can-you-put-it-to-work/?sh=43d4e61f540b>.
- 15) Craig W. What Is 'Maker Culture,' And How Can You Put It To Work? [Internet]. Forbes. 2015 [citado 15 abril 2020]. Disponible en: <https://www.minvivienda.gov.co/node/24562>
- 16) 8. Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition [Internet]. Ellen MacArthur Foundation. 2015 [citado 15 abril 2020]. Disponible en: https://ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_26-Nov-2015.pdf

- 17) Materiales de impresión 3D (I): PLA, ácido poliláctico [Internet]. HXX. 2015 [citado 2 enero 2020]. Disponible en: <http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/co/>
- 18) 10. Materiales de impresión 3D (II): ABS, acrilonitrilo butadieno estireno [Internet]. HXX. 2015 [citado 2 enero 2020]. Disponible en: <http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/>
- 19) Lokensgrad E, Richardson TL. Industria del plástico. Madrid: Ediciones Paraninfo; 2000.
- 20) Ramos LF. Extrusión de plásticos: principios básicos. Saltillo, Coahuila, Mexico: Editorial Limusa; 1993.
- 21) Wilkes CE, Daniels CA, Summers JW. PVC Handbook, Editorial Hanser. 2005
- 22) Agustín Durán M. Informe general sobre trituración en la industria de inyección de plásticos [Internet]. Canales Sectoriales Interempresas. 2015 [citado 3 enero 2020]. Disponible en: <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/8174-Informe-general-sobre-trituracion-en-la-industria-de-inyeccion-de-plasticos.html>
- 23) El uso de molinos de cuchillas en el reciclaje de plástico [Internet]. Quiminet. 2011 [citado 3 enero 2020]. Disponible en: <https://www.quiminet.com/articulos/el-uso-de-molinos-de-cuchillas-en-el-reciclaje-de-plastico-2588566.html>
- 24) Gaitán Hernández DF. Diseño de un molino triturador para molinos termoplásticos para la empresa Industria Recuplast S.A.S. Universidad Libre de Colombia; 2017.

- 25) Descripción de la máquina: Trituradora de dos árboles [Internet]. Tritotutto. 2019 [citado 3 de enero de 2020]. Disponible en: <http://www.tritotutto.com/es/descripcion-de-la-maquina-trituradoras-de-2-arboles>
- 26) Serie S Isve: funcionamiento y características principales de la nueva serie 2010 [Internet]. Tritotutto. 2019 [citado 3 de enero de 2020]. Disponible en: <http://www.tritotutto.com/es/tritotutto-serie-s-isve-funcionamiento-y-caracteristicas-principales-de-la-nueva-serie-2010>
- 27) Trituradoras mono-árbol, serie MR-2013 [Internet]. Tritotutto. 2019 [citado 3 de enero de 2020]. Disponible en: <http://www.tritotutto.com/es/trituradoras-mono-arbol-molinos-serie-mr-2013>
- 28) AMFG. The additive manufacturing landscape 2019 [Internet]. Londres; 2019 [citado 25 octubre 2020]. Disponible en: <https://amfg.ai/whitepapers/whitepaper-the-additive-manufacturing-landscape-2019/#>
- 29) Overview of materials for Polyethylene Terephthalate (PET), Unreinforced [Internet]. MatWeb Material Property Data. 1996 [citado 25 octubre 2020]. Disponible en: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=a696bdcdf6f41dd98f8eec3599eaa20&ckck=1>
- 30) Pathophysiology of Thermal Burn Injury [Internet]. Pierce County. 2007 [citado 1 noviembre 2020]. Disponible en: <http://wa-piercecounty.civicplus.com/DocumentCenter/View/3352>
- 31) 4. Pathophysiology of Thermal Burn Injury [Internet]. Centers for Disease Control and Prevention. 2019 [citado 27 octubre 2020]. Disponible en: https://www.cdc.gov/nceh/hearing_loss/what_noises_cause_hearing_loss.html

- 32) Design Toolkit | Modelo KANO [Internet]. Universitat Oberta de Catalunya. [citado 30 de octubre de 2020] Disponible en: <http://design-toolkit-test.uoc.edu/es/modelo-kano/>
- 33) Polyethylene Terephthalate Bottles Packaging [Internet]. Packaging Consultancy. 2019 [citado 15 de noviembre de 2020] Disponible en: [http://www.packagingconsultancy.com/polyethylene-terephthlate-water-bottles.html#:~:text=Polyethylene%20Terephthlate%20\(PET\)%20Water%20Bottles,-The%20PET%20bottle&text=The%20toughness%20of%20PET%20also,bottle's%20lower%20portion%20reducing%20slippage.](http://www.packagingconsultancy.com/polyethylene-terephthlate-water-bottles.html#:~:text=Polyethylene%20Terephthlate%20(PET)%20Water%20Bottles,-The%20PET%20bottle&text=The%20toughness%20of%20PET%20also,bottle's%20lower%20portion%20reducing%20slippage.)
- 34) Recommended maximum force for human hand - Human Ergonomics [Internet] MEADinfo. 2009 [citado 17 de noviembre de 2020]. Disponible en: <https://www.meadinfo.org/2009/05/recommended-maximum-force-for-human.html>
- 35) Burge, S. (2009), The Systems Engineering Tool Box - Pugh Matrix, National Science Teaching Association
- 36) Hakkens D. Build a Shredder Pro [Internet], Precious Plastic. 2019 [citado 20 de noviembre de 2020]. Disponible en: <https://community.preciousplastic.com/academy/build/shredderprobuilt>
- 37) Ross A. Bicycle Parking Info [Internet]. Bicycle Federation of Wisconsin. 2021 [consultado 3 de enero de 2021]. Disponible en: <https://pccsc.net/bicycle-parking-info/#:~:text=The%20critical%20dimensions%20are%20bicycle,length%20is%20about%2068%20inches.>

- 38) TEC IE2 2.2kW Three Phase Motor 230V/400V 2 Pole 90 Frame B34 [Internet]. Inverter Drive Super Market. [citado 12 de abril de 2020]. Disponible en: <https://inverterdrive.com/group/Motors-AC/TECA2-90L-2-B34-IE2-High-Efficiency-2-Pole-Motor/>
- 39) Nau S, Mello H. Acoustic noise in induction motors: causes and solutions. En: Record of Conference Papers. Industry Applications Society Forty-Seventh Annual Conference. 2000. pp. 253–263. Disponible en: 10.1109/PCICON.2000.882782.
- 40) Felfil Evo Basic Kit [Internet]. Felfil. [citado 27 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://felfil.com/es/shop/felfil-evo-basic-kit/?v=5ea34fa833a1>.