

Desarrollo de un prototipo de máquina trituradora y extrusora de plástico



Universidad
Mariana

Desarrollo de un prototipo de máquina trituradora de plástico reciclado y extrusora de filamentos

para impresoras 3D

Edison Steven Benavides Granja

Jairo Andrés Fajardo Latorre

Universidad Mariana

Facultad Ingeniería

Programa Mecatrónica

San Juan de Pasto

2024

Desarrollo de un prototipo de máquina trituradora y extrusora de plástico

Desarrollo de un prototipo de máquina trituradora de plástico reciclado y extrusora de filamentos para impresoras 3D

Edison Steven Benavides Granja

Jairo Andrés Fajardo Latorre

Informe de investigación para optar al título de: Ingeniero Mecatrónico

PhD. Richard Geovanni Moran Perafán

Asesor

Ing. Daniel Mateo Burbano Martínez

Co-Asesor

Universidad Mariana

Facultad Ingeniería

Programa Mecatrónica

San Juan de Pasto

2024

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son
responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007

Universidad Mariana

Agradecimientos

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a nuestro Asesor y Co-Asesor, por su guía experta, apoyo constante y valiosas sugerencias a lo largo de este proyecto. Su dedicación y compromiso han sido fundamentales para el desarrollo y la finalización de esta tesis.

Mis más sinceros agradecimientos van dirigidos a mi familia, por su amor incondicional, paciencia y comprensión durante este desafiante período. Su apoyo moral y emocional ha sido mi roca en momentos de duda y dificultad.

A mis amigos y compañeros de clase, les agradezco por su compañerismo, motivación y por compartir conmigo este viaje académico. Sus palabras de ánimo y su camaradería han hecho que este proceso sea mucho más llevadero y gratificante.

Por último, pero no menos importante, quiero expresar mi profunda gratitud a todas las personas que han contribuido de alguna manera a este trabajo, ya sea proporcionando recursos, compartiendo su experiencia o simplemente brindando su apoyo moral.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, cuyo apoyo incondicional y sacrificio han sido la fuerza motriz detrás de mi educación. También quiero agradecer a mis amigos y familiares por su constante ánimo y comprensión. Este logro es también para ustedes.

Esta tesis está dedicada a mi mentor académico, cuya guía experta y paciencia han sido fundamentales en mi desarrollo intelectual. Agradezco también a mis compañeros de clase por sus valiosas contribuciones y apoyo mutuo a lo largo de este viaje académico.

Dedicatoria

A mi familia, cuyo amor, aliento y sacrificio han sido el sostén inquebrantable a lo largo de este arduo camino académico. A mis padres, quienes han sido mi ejemplo de perseverancia y dedicación, les dedico este logro con profundo agradecimiento por su constante apoyo y comprensión. A mis hermanos, por su amistad, humor y motivación inquebrantable, les agradezco por ser mi fuente de inspiración.

Tabla de contenido

Agradecimientos	4
Dedicatoria	5
Dedicatoria	6
Introducción	11
1. Resumen del proyecto	12
1.1 Descripción del Problema	13
1.1.1. Formulación del problema	14
1.1 Justificación	14
1.2 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo general	15
1.3.2 Objetivos específicos	15
1.4. Marco referencial o fundamentos teóricos	16
1.4.1 Marco de antecedentes	16
1.4.1.1. Criterios de búsqueda en la base de datos de Scopus.	16
1.4.1.2. Descripción de artículos	17
1.4.2. Marco teórico	24
1.4.2.1 Plásticos.	25
1.4.2.3. Tipos de procesos de fabricación.	28
1.4.2.4 Maquinas trituradoras.	31
1.4.4 Marco conceptual	35
1.4.4.1. Origen y evolución del plástico.	35
1.4.4.2. Reciclaje de materiales plásticos.	36
1.4.4.3 Clasificación de los plásticos reciclables.	37
1.5 Metodología	38
1.5.1 Tipo de Investigación	38
1.5.2 Línea de investigación	38
1.5.3 Hipótesis de la investigación	38
1.5.3.1 Hipótesis investigación	38
1.5.3.2 Hipótesis alternativa:	38
1.5.3.3 Hipótesis nula:	38

1.5.4 Descripción metodológica	39
1.5.4.2 Fase 2. Clasificación de materiales y construcción del prototipo.	40
1.5.5 Validez de la investigación	41
1.5.5.1 Condiciones de la recolección de datos	41
1.5.5.1.1.....	41
1.5.5.1.2.....	42
1.5.5.1.3.....	44
2. Presentación de resultados	45
2.1 Resultados de acuerdo a los objetivos	45
2.1.1 Resultados del objetivo 1	45
2.1.1.1Componentes de trituradora.....	46
2.1.1.2 Alternativas de diseño de trituradora.	46
2.1.1.1 Resultados de la evaluación.	49
2.1.1.2 Boceto del diseño del prototipo de trituradora PET (Dimensiones en metros).	50
2.1.1.3 Cálculos de la trituradora.	50
2.1.1.4 Cálculo de Fuerza, Torque y Potencia en Eje con Cuchillas.	50
2.1.1.5 Fuerza que actúa sobre el borde de la cuchilla.	51
2.1.1.6 Potencia requerida.....	51
2.1.1.7 Ensamblaje de la trituradora de cuchillas de un eje.....	52
2.1.1.8 Bosquejo de la extrusora y partes.	52
2.1.1.9 Cálculos extrusora.....	54
2.1.2 Resultados del objetivo 2.....	56
2.1.2.1 Presupuesto de materiales.	56
2.1.2.2 Compra de materiales.	58
2.1.2.3 Ensamblaje y fabricación de los prototipos	58
2.1.3 Resultados del objetivo 3.....	64
2.1.3.1 Pruebas y ajustes.	64
2.1.3.2 Evaluar las funciones del prototipo.....	66
Conclusiones.....	67
Recomendaciones	68
Referencias.....	69

Lista de tablas

Tabla 1	Base de datos.....	18
Tabla 2	Artículos más citados.....	19
Tabla 3	Top 5 de toda la historia.....	23
Tabla 4	Especificaciones de desempeño.....	47
Tabla 5	Ventajas y desventajas de las alternativas.....	49
Tabla 6	Matriz de selección.....	50
Tabla 7	Ponderación de cada aspecto.....	51
Tabla 8	Presupuesto de materiales.....	59

Lista de figuras

Figura 1. Criterios de búsqueda definidos entre los años 2000 y 2024	18
Figura 2. <i>Taxonomía</i>	35
Figura 3. <i>Clasificación de los plásticos reciclables</i>	39
Figura 4. Alternativas de diseño de trituradora	48
Figura 5. Boceto del diseño del prototipo de trituradora PET	52
Figura 6. Ensamblaje de la trituradora de cuchillas de un eje	53
Figura 7. Boceto del diseño de la extrusora	55
Figura 8 Cortes plasma de cuchillas	61
Figura 9 Tratamiento térmico cuchillas	61
Figura 10 Fabricación del eje en torno	62
Figura 11 Ajuste de caja de trituración	62
Figura 12 Ensamblaje del prototipo trituradora	63
Figura 13. Elaboración de la extrusora parte de la tolva y cañón	64
Figura 14. Fabricación de la parte de extrusión	65
Figura 15. Trasmisión de la extrusora	65
Figura 16. Ensamblaje final	66
Figura 17. Ajustes de la extrusora y resistencia	67
Figura 18. Filamento	67
Figura 19 Pruebas y ajustes de la trituradora	68
Figura 20 Resultados finales de la trituradora	69

Introducción

Con el aumento de la población y el crecimiento de las industrias, los residuos plásticos PET han aumentado considerablemente, estos residuos provienen principalmente de envases de jugos, aguas, aceites, refrescos, entre otros. Este problema cada vez más afecta el medio ambiente y la sociedad. Para mitigar este problema es necesario implementar tecnologías que fomenten la reutilización de estos residuos y que pueden convertirse en materia prima de productos de uso prolongado como aquellos productos a base de madera plástica o artículos impresos en 3D. El reciclaje y reutilización de plásticos constituye una alternativa para disminuir la contaminación ambiental, mientras genera beneficios económicos que favorecen la aplicación de esta práctica

El diseño del prototipo de la maquina trituradora es un mecanismo que nos permite hacer el ciclo de aprovechamiento de los residuos de botellas plástico. Este prototipo aborda de manera efectiva el problema creciente de la contaminación plástica. Al proporcionar una solución eficiente, impulsa la conciencia sobre la importancia de la sostenibilidad ambiental en la sociedad actual.

El diseño del prototipo de la maquina extrusora es un mecanismo ágil para la creación del filamento PET. Ofreciendo una solución eficiente para la creación de filamentos PET, abordando la creciente demande de materiales reciclados en impresión 3d. Impulsando a la innovación de materiales sostenibles para fabricación de tecnologías emergentes.

1. Resumen del proyecto

En este trabajo de grado se destaca que el plástico es un material químicamente muy estable por lo cual no se degrada fácilmente, como gran parte de los empaques de productos se hacen con plásticos, los residuos generados de su uso másico se acumulan en vertederos, ríos y océanos generando un gran problema ambiental. En Colombia, se recicla un bajo porcentaje de plástico, lo que agrava el problema.

El Para abordar esta situación, se propone desarrollar un prototipo de máquina trituradora y extrusora de plástico reciclado, específicamente de botellas de PET. El objetivo es obtener filamentos de plástico que puedan utilizarse como materia prima en impresoras 3D. Esto permitiría incentivar el reciclaje y reducir la contaminación plástica.

El proyecto se justifica por su potencial para generar estímulos económicos para el reciclaje, reducir los costos de impresión, prolongar la vida útil de los plásticos y formar a los autores del trabajo en tecnología Mecatrónica. Los objetivos incluyen diseñar y construir el prototipo de la máquina, así como evaluar su desempeño.

El marco conceptual aborda el origen y la evolución del plástico, así como los procesos de reciclaje de materiales plásticos. Se menciona la clasificación de los plásticos reciclables y se resalta la importancia del PET como material de enfoque en el proyecto.

1.1 Descripción del Problema

El plástico “es un material polimérico con una estructura química formada por enlaces covalentes lo que lo hace un material muy estable químicamente” (Álvarez, 2021). Esto implica que “este material es muy resistente a los ataques químicos, pero que también hacen que este material no se degrade fácilmente. Se estima que un plástico puede tardar 1000 años en descomponerse” (Tellez, 2012).

En la actualidad el plástico es un material ampliamente usado, debido a sus bajos costos de fabricación y versatilidad para crear formas intrincadas. Los empaques de productos alimenticios y bebidas se fabrican masivamente y se desechan en grandes cantidades saturando los rellenos sanitarios, contaminando ríos, campos y océanos.

Una forma de mitigar el impacto de los desechos plásticos es reciclarlos para elaborar productos de duración más prolongada, como muebles u objetos decorativos que sustituyan materiales menos contaminantes como la madera. Infortunadamente, en Colombia y en el departamento de Nariño se recicla un bajo porcentaje de plástico cuyos desechos generan un gran impacto ambiental (Clinica Jurídica del Medio ambiente, 2019).

Según el periódico Diario Occidente (2019) la mayoría de las personas desechan 2 kg de plástico al mes, es decir que al año se desechan en promedio 24 kg de basura plástica por persona. “La organización ambiental Efecto Rebote dice que más de 1 millón de toneladas de plástico se generan en el país, pero solamente el 7% es reciclado, los residuos resultantes se terminan acumulado en los rellenos sanitarios o se arroja a las montañas, los valles, y los ríos”.

Para mitigar el impacto de los residuos plásticos, se deben proponer medidas para estimular el reciclaje, principalmente de botellas plásticas. Una forma de aprovechar estos residuos es usarlo como materia prima para impresoras 3D, las cuales son una tecnología novedosa de fabricación y que usan como materia prima filamentos plásticos costosos como el PLA y ABS.

Así en este proyecto se propone desarrollar un prototipo de máquina para triturar botellas y extruir filamentos de plástico PET reciclado. Con ello se tendrían estímulos económicos para el reciclaje de envases y se disminuirían los desechos plásticos que son altamente contaminantes.

1.1.1. Formulación del problema

¿Cómo desarrollar un prototipo de máquina trituradora de plástico reciclado y extrusión de filamentos para usarlos como materia prima de impresoras 3D?

1.1 Justificación

El proyecto se justifica porque pretende usar tecnologías mecatrónicas para el desarrollo de un prototipo que permite fabricar filamentos plásticos reciclados para usarlos en impresión 3D. Con ello se generan estímulos económicos para reciclar envases plásticos y reducir así la contaminación de campos, ríos y océanos.

Al usar estos filamentos plásticos para fabricar componentes impresos en 3D, se abre la posibilidad de que estos residuos tengan un uso más prolongado que el plástico de un solo uso, el

cual es ampliamente empleado para fabricar envases. Es decir que esta sería una forma alternativa de atrapar carbono.

Por otro lado, con este proyecto se busca reducir los costos de impresión ya que el filamento se crea con material reciclado (PET), y esta materia prima se encuentra fácilmente en las calles o botes de basura y no tiene ningún costo y su reutilización disminuye el impacto ambiental de este material.

Por otra parte, este proyecto constituye una oportunidad para generar condiciones favorables para la aplicación de la Ingeniería Mecatrónica en el departamento de Nariño y formar a los autores del trabajo a través de una experiencia de desarrollo de una tecnología.

1.2 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un prototipo de máquina capaz de transformar envases plásticos reciclados de PET en filamentos de materia prima para impresión 3D.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar los componentes mecánicos y electrónicos del prototipo para triturar envases y extruir filamentos que sirvan como materia prima para impresoras 3D.
- Construir un prototipo funcional para triturar envases y extruir filamentos de plástico de acuerdo al diseño planeado.
- Evaluar el desempeño del prototipo mediante pruebas y establecer recomendaciones de uso.

1.4. Marco referencial o fundamentos teóricos

1.4.1 Marco de antecedentes

A partir de la revisión de bibliografías realizadas en bases de datos como Scopus y Google Scholar y aplicando los filtros en tittle, keywords y abstract ("shredder" AND "plastic" and "filament" or "recycling" or " Thermoplastic") también se filtró la búsqueda en los últimos años de los documentos más citados y 5 de toda la historia.

1.4.1.1. Criterios de búsqueda en la base de datos de Scopus. En este apartado, se reconoce la importancia de realizar búsquedas sistemáticas en las bases de datos y, para ello, se hace uso de algunos criterios de búsqueda que van entre comillas y algunos conectores de tipo lógico como AND y OR.

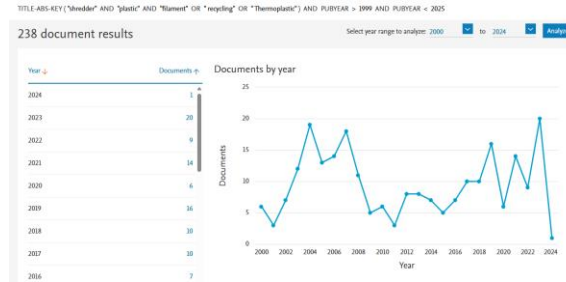
Tabla 1

Base de datos

Tipo de búsqueda	Año
Criterios de búsqueda	"shredder" AND "plastic" AND "filament" OR " recycling" OR " Thermoplastic"
Periodo de búsqueda	2000 - 2024
Número de documentos encontrados sin filtros	238
Idioma	Inglés y Español
Filtro por área temática	Ingeniería, Ciencias ambientales, Ciencia de materiales
Tipos de documentos encontrados con filtros	87

1.4.1.2. Descripción de artículos. Para reconocer la evolución del tema a lo largo de los años, se lleva a cabo un análisis de los artículos relevantes que han surgido durante los años 2000 y 2024, utilizando los criterios de búsqueda previamente definidos.

Figura 1. Criterios de búsqueda definidos entre los años 2000 y 2024.



Fuente: Scopus.

Tabla 2

Artículos más citados

N	Año	Autores		N.	Área temática
				citaciones	
1	2014	M.A. Kreiger,	M.L. Mulder,	195	Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament
		A.G. Glover,	J.M. Pearce		
2	2020	Katarzyna Mikula,	Dawid Skrzypczak,	84	3D printing filament as a second life of waste plastics—a review
		Grzegorz Izydorzycyk,	Jolanta Warchoł,		

		Konstantinos Moustakas,			
		Katarzyna Chojnacka, Anna			
		Witek-Krowiak			
3	2018	Mohanad Idrees, Shaik Jeelani, and Vijaya Rangari	51		Three-Dimensional-Printed Sustainable Biochar-Recycled PET Composites
4	2017	Akinfiresoye Waleola Ayo, Oj Olukunle, D. Adelabu	25		Development of a Waste Plastic Shredding Machine
5	2002	Xanthos, M., Dey, S.K., Mitra, S., Yilmazer, U., Feng, C.	15		Prototypes for building applications based on thermoplastic composites containing mixed waste plastics

Nota: Datos corresponde a la búsqueda sistemática como se muestra en la tabla en las bases de datos de Scopus.

Estos autores hablan del crecimiento de reutilización y reciclaje de polietileno de alta densidad para la tecnología de impresión 3D, con lo cual se puede fabricar filamento reciclado para bajar costos y disminuir el impacto ambiental de esta tecnología, el sistema de reciclado se centra en las zonas rurales de alta población lo cual favorecen a la reutilización de este material (Kreiger, 2014).

La trituración del plástico implica reutilizar este material pos consumo y extruirlo en filamentos como producto utilizable que incorpora al polietileno de alta densidad, así se demuestra el potencial de este proceso para estimular el reciclaje de material altamente contaminante (A.G. Glover, J.M. Pearce, 2014). El uso de material reciclado en impresoras 3D se centra el estudio en la recolección y el proceso del polietileno que involucra de manera significativa disminuir costos

de filamentos y contaminación ambiental y representa caminos novedosos que ayudan al impacto medio ambiental.

Según los autores Mohanad Idrees, Shaik Jeelani, y Vijaya Rangari los materiales poliméricos se han encontrado una aplicación en muchas áreas de la vida cotidiana y la industria. La posibilidad de reutilizar materiales poliméricos da una posibilidad de valorización, una segunda vida, y permite la utilización efectiva de los residuos para obtener productos consumibles. Los filamentos imprimibles se pueden hacer de una variedad de materiales termoplásticos, incluidos los del reciclaje. los autores verificaron la posibilidad de reciclaje de materiales termoplásticos básicos y el impacto del procesamiento en sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas.

Además, revisaron los filamentos disponibles comercialmente producidos a partir de materiales reciclados y dispositivos que permiten la autoproducción de filamentos para la impresión 3D a partir de residuos plásticos.

Recientemente, la demanda de compuestos de polímeros imprimibles en 3D de alto rendimiento ha crecido exponencialmente. El objetivo de este trabajo es desarrollar un nuevo compuesto de poli reciclado de biochar de bajo costo y sostenible con un rendimiento mecánico y térmico mejorado. (Idrees, M., Jeelani, S., Rangari, V., 2018)El biochar se molió y tamiza por debajo de 100 μm , y se fundió compuesto con poli reciclado derivado de botellas de PET posconsumo. Los filamentos compuestos de biochar/PET de 1,75 mm se produjeron utilizando una extrusora fundida. Estos resultados mostraron que la incorporación de biochar mejoró las propiedades

mecánicas, térmicas y dinámicas del compuesto. Una infusión de biochar al 0,5% en peso en PET resultó en un aumento del 32% en la resistencia a la tracción.

Los autores evaluaron el desempeño de la máquina y los resultados de las pruebas mostraron que había una correlación entre la velocidad de la máquina con una regresión < 1 y había una relación lineal con todos los parámetros variables (El tiempo de trituración (T), la Energía mecánica específica (SME), rendimiento (TP) y eficiencia de recuperación (RE)) y las velocidades de operación variables (1806,7 rpm, 1290,5 rpm y 1003,7 rpm).

Akinfiresoye Waleola Ayo, OJ Olukunle y DJ Adelabu (2017), la máquina es fácil de usar y el costo de producir una unidad de la máquina en el momento de la fabricación se estimó en ciento cuarenta mil, setecientos cincuenta naira (N 140, 750: 00k) que son pesos de Nigeria que en dólares son 305 usd. Lo que hace que sea asequible adquirir para pequeños y medianos empresarios en el negocio de reciclaje de residuos plásticos.

El estudio de este artículo trata sobre los residuos de una trituradora automotriz y un residuo complejo obtenido como subproducto en el reciclaje terciario de fibras de nylon-6 de alfombras usadas. Los autores (Xanthos, M., Dey, S.K., Mitra, S., Yilmazer, U., Feng, C., 2002) evaluaron como aditivos potenciales en compuestos termoplásticos para ser utilizados en aplicaciones de construcción. La encapsulación de la materia prima de residuos por LDPE durante el moldeo en una extrusora de un solo tornillo redujo significativamente el contenido lixiviable. La materia prima de residuos de alfombras que consiste en polipropileno, caucho de estireno-butadieno y carbonato de calcio parece ser un material atractivo de bajo costo y alto volumen con propiedades

consistentes y podría usarse como relleno en compuestos termoplásticos. La comparación de sus características de rendimiento sugirió que los compuestos de residuos de alfombras se verían favorecidos frente a los compuestos ASR como reemplazo de los componentes de barrera térmica de madera en un nuevo ensamblaje de pernos a base de acero.

Tabla 3

Top 5 de toda la historia

N	Año	Autores	Número de Citaciones	Área temática
6	2019	Lee, Dongoh; Lee, Younghun; Lee, Kyunghyun; Ko, Youngsu; Kim, Nams	14	Development and Evaluation of a Distributed Recycling System for Making Filaments Reused in Three-Dimensional Printers
7	2020	Nur-A-Tomal, M.S., Pahlevani, F., Sahajwalla, V	11	Direct transformation of waste children's toys to high quality products using 3D printing: A waste-to-wealth and sustainable approach
8	2018	Sudhakara Reddy and Thunga Raju	10	Design and Development of mini plastic shredder machine
9	2022	Stefaniak, Aleksandr B.; Bowers, Lauren N.; Cottrell, Gabe.; Erdem, Ergin.; Knepp, Alycia K.; Martin, Stephen B.; Pretty,	8	Towards sustainable additive manufacturing: The need for awareness of particle and vapor releases during polymer recycling,

	Jack.; Pretty, Jack.;	Pretty,		making filament, and fused filament
	Jack.;	Wilson, Zachary.;		fabrication 3-D printing
	Wilson, Zachary.;	Fortner,		
	Alyson R.			

10	2016	E.K. Orhororo, A.E. Ikpe	0	Performance Analysis of Locally
		and R.I. Tamuno		Design Plastic Crushing Machine for
				Domestic and Industrial Use in
				Nigeria

Debido a un aumento en el número de aplicaciones para impresoras 3D, el uso de resinas termoplásticas como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y el ácido poliláctico (PLA), que son materiales de filamento típicos para impresoras 3D de tipo fabricación de filamentos fundidos, también ha aumentado significativamente. Además, este sistema de reciclaje es muy útil para hacer filamentos funcionales como filamentos altamente conductores o de alta resistencia mediante la combinación de nanotubos de carbono durante el proceso de reciclaje. El sistema integra cuatro partes principales para reciclar filamentos: una trituradora, que tritura los residuos de polímero en trozos pequeños; un extrusor, que extruye filamento de las piezas trituradas; un componente de detección y control, que regula el diámetro del filamento extruido a través de un sistema de control de bucle cerrado, y un carrete. También investigan sobre la comparación de la precisión dimensional, la resistencia mecánica de los filamentos prístinos y reciclados.

La mayoría de los juguetes de plástico posconsumo están siendo terminados como residuos. Los residuos de juguetes de plástico pueden suponer un gran riesgo tanto para las personas como

para el medio ambiente; Al mismo tiempo, perderemos muchos materiales valiosos que podrían reciclarse. Los autores evaluaron las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los filamentos preparados. Las tensiones termo mecánicas repetidas no alteraron significativamente las propiedades de los polímeros hasta diez ciclos de reprocesamiento, lo que sugiere que los juguetes de plástico de desecho se pueden reciclar al final de su vida útil. Las propiedades mecánicas de las muestras impresas en 3D de residuos plásticos eran tan buenas como el material virgen. El proceso desarrollado en este estudio puede reducir la huella de carbono y el costo de producción.

Como podemos mirar el uso del plástico estás aumentando día a día aumentando la contaminación ambiental con este medio queremos tratar de reutilizar gran cantidad de plásticos, ya que existen varias máquinas de trituración, pero tienen unos elevados costos.

El objetivo principal de este estudio es diseñar y fabricar una máquina trituradora de plástico en cuanto a la fuente de alimentación y el mecanismo de un solo eje que puede ser usado en las micro, pequeñas y medianas empresas, para llevar a cabo esta máquina trituradora consta de algunos componentes mecánicos y electrónicos como una estructura, una tolva, motor eléctrico, etc.

Esta máquina será utilizada para cortar el plástico en trozos más pequeños, reciclar puede ayudar a recuperar la materia prima lo que esto ayudaría a fabricar productos nuevos de plástico, el plástico triturado será llevado a un extrusor donde este puede formar el plástico triturado en filamentos de plástico y este será utilizado en una impresora 3D.

Este estudio caracterizó las emisiones de contaminantes de plásticos vírgenes y reciclados de la producción de filamentos a través de la impresión 3D FFF. Todas las tareas liberaron partículas que contenían metales peligrosos y con un tamaño capaz de depositarse en la región de intercambio de gases del pulmón, es decir, granulación de residuos de PLA y ABS y fabricación de filamentos e impresión 3D FFF con residuos y plásticos vírgenes.

Estos datos como dicen los autores son útiles para incorporar los riesgos de exposición a contaminantes peligrosos en futuras evaluaciones del ciclo de vida para demostrar el potencial de sostenibilidad y economía circular de la impresión 3D FFF en espacios distribuidos.

Este artículo se centra en el análisis del rendimiento De trituradora de plástico de diseño local para uso doméstico y uso industrial en Nigeria. El análisis de rendimiento fue llevado a cabo en la máquina trituradora de plástico y la eficiencia se calculó como 85.16% mientras que la máquina promedio a través de la capacidad put se determinó como 0,112 kg/seg. Considerando los resultados obtenidos, la trituradora de plástico fue eficiente Suficiente para uso doméstico e industrial.

1.4.2. Marco teórico

Se presenta una revisión de la teoría y tecnología de fabricación de materiales plásticos y el reciclaje de los mismos. Teniendo en cuenta las características físicas de los plásticos los procesos de fabricación, incluyendo el tema de manufactura aditiva como mecanismo de transformación de plásticos. Por otro lado, se presenta la taxonomía, en el cual se abordará la categorización de temas relacionados con la investigación. Finalmente, el marco teórico y estado del arte presentan teorías y conceptos relevantes para el desarrollo del proyecto.

1.4.2.1 Plásticos.

1.4.2.1.1 Termoestable. La creación de moléculas con enlaces covalentes que hizo posible la fabricación de plásticos ha sido seguramente una innovación notable. Sin embargo, los procesos químicos de síntesis de plásticos requieren tanto una precisa regulación de la presión y la temperatura como la adición de catalizadores, de modo que se producen compuestos formados por súper moléculas difícilmente degradables. (Gunter, 2011) , es por esto que si tenemos en cuenta lo dicho anteriormente, se considera que el plástico es de alta complejidad para ser tratado, y al hablar del plástico termoestables este, es un tipo de plásticos que después de haber sido curados, por medio de calor u otro medio, no pueden ser fundidos o solubilizados sin romper su estructura química, este se comporta de manera completamente diferente a los termoplásticos. Cuando se calienta por primera vez, el polímero se ablanda y se puede moldear bajo presión. Sin embargo, bajo la influencia del calor, comienza una reacción química donde las moléculas se unen permanentemente. Esta reacción se llama descomposición. Como resultado, el polímero se vuelve permanentemente rígido y no se ablanda cuando se calienta, sino que se destruye. (Roymaplast, 2022).

1.4.2.1.2 Poliuretano. Por otro lado, abarcamos el Poliuretano (PRU) fue descubierto en el año 1937, por investigaciones de Otto Bayer (1902 – 1982) y comenzó la implementación durante la Segunda Guerra Mundial como un sustituto a los cartuchos que para ese entonces era más costoso y difícil su obtención. Y también se comenzó con nuevos usos como lo era el refuerzo en recubrimiento para aviones, batallones, hasta ropa resistente. (Polyurethanes, 2008), el cual trata de un material plástico que se puede aprovechar de diversas formas en gran cantidad de situaciones. En la actualidad estos usos son domésticos y también industriales como por ejemplo la fabricación de varios elementos:

- Aislante para neveras y congeladores

- Productos aislantes para la construcción
- Acolchado para muebles
- Colchones
- Componentes de automóviles
- Adhesivos
- Pinturas
- Rodillos y ruedas
- Ropa deportiva

1.4.2.1.3 Resinas de poliéster. Las resinas de poliéster son líquidas a temperatura ambiente y pueden ser llevadas a estado sólido, en el caso de las resinas pre-aceleradas, por la adición de un catalizador; y para resinas no pre-aceleradas un acelerador y un catalizador. Las resinas se presentan en forma de plásticos termo-estables que son los que se emplean en los materiales compuestos. (Gil, 2012)

Resinas o recubrimientos epoxi. Los compuestos epoxi son un grupo de éteres cíclicos u óxidos de alqueno (alquileno), que poseen un átomo de oxígeno unido a dos átomos de carbono adyacentes (estructura oxirano). Estos éteres reaccionan con los grupos amino, oxhidrilo y carboxilo (endurecedores), así como con los ácidos inorgánicos, para dar compuestos relativamente estables. En 1946 la firma CIBA adquirió la licencia de explotación de las resinas derivadas de la Epiclorhidrina y Bisfenol A, comenzando el espectacular desarrollo que han experimentado los compuestos epoxídicos. Actualmente con el elevado número de las distintas resinas básicas y el avance conseguido en los sistemas de aplicación, es muy difícil imaginar un área tecnológica donde las resinas epoxi no sean utilizadas. (Bardojej Z, Hladik F, Rejkova V, Urban J y Zenata E, 1980)

1.4.2.2. Termoplásticos. Son polímeros lineales, por lo que son solubles en ciertos disolventes orgánicos y son reciclables. Los termoplásticos pueden tener una temperatura de transición vítrea (T_g) en estado amorfo o un punto de fusión (T_m) por encima de la temperatura ambiente para materiales cristalinos, normalmente no existen polímeros que sean 100% cristalinos, por lo que la transición vítrea ocurre en estado amorfo. se registra la parte de temperatura y el punto de fusión de la parte cristalina, esta propiedad permite que los termoplásticos se solidifiquen y fundan varias veces, por lo que se utilizan en impresoras 3D depositando material fundido. (Molina Osejos, Jaime Vinicio, 2016)

1.4.2.1.3 Tereftalato de polietileno. JR Whinfield y J.T. Diclinos patentaron esta fibra como polímero en 1941. Años más tarde, en 1951, se inició la producción comercial de fibras de poliéster. Desde entonces, la producción de PET ha mostrado un continuo desarrollo tecnológico, alcanzando alta calidad y diversificando sus usos. Desde 1976 se utiliza para fabricar envases ligeros, transparentes y duraderos, principalmente para bebidas, que originalmente eran botellas gruesas y rígidas, pero hoy son mucho más ligeras, sin perder sus excelentes propiedades de almacenamiento. Se utiliza principalmente en refrescos, agua mineral, cosméticos, aceites, salsas, películas de rayos X, cintas de video, etc. (Jose Gabriel Hachi Quintana , Juan Diego Rodriguez Mejia, Rafael Coronel , 2010).

1.4.2.1.4 Polietileno.

- **Baja densidad** se usa en bolsas de supermercado, panificación, congelados también en pañales desechables, bolsas para sueros, pomos para cosméticos y medicamentos.
- **Alta densidad** usado en envases para detergentes, aceites de vehículos, shampoo, canastas para gaseosas y cervezas, baldes para pinturas, tuberías de gas, drenaje y uso sanitario. (Jose Gabriel Hachi Quintana , Juan Diego Rodriguez Mejia, Rafael Coronel , 2010).

- **Cloruro de polivinilo (PVC).** Usado para perfiles, marcos de ventanas, puertas, tuberías, mangueras, papel vinilo para decoración, pilas, juguetes, fiambres. (Jose Gabriel Hachi Quintana , Juan Diego Rodriguez Mejia, Rafael Coronel , 2010).

1.4.2.3. Tipos de procesos de fabricación.

1.4.2.3.1 Extrusión. Esta técnica es cada vez más utilizada en conversiones debido a su versatilidad. El desarrollo de nuevos productos y su eficiencia, tanto productiva como energética. Porque requiere una concentración muy ligera y una necesidad de tener más, para revelar conocimiento de los fenómenos físicos y químicos de los componentes principales relacionados con esta tecnología, que afecta las características de calidad final del producto. Un proceso de extrusión es un proceso en el que se expulsa un polímero o material fundido consistencia de goma, con la ayuda de presión más allá del tornillo simple más familiar como un huso.

La parte más importante es el husillo, que es un accesorio de compresión dentro del manguito. Cilíndrico con suficiente espacio para la rotación se adjunta a la máquina un por un extremo y por el otro extremo sale el material fundido y homogeneizado para exposición lista o en otros casos sale ya perfilado. Es un tornillo que lleva a cabo el transporte, la mezcla y el prensado material dentro del cilindro, se debe pulir muy bien el husillo para que la masa no penetre cerrado y girando con el husillo. (Rosato, D., Rosato, A., Mattia, & D, 2004).

1.4.2.3.2. Moldeo por inyección. Los factores principales del proceso son el tiempo, la presión, la temperatura y la velocidad de flujo, los cuales cambian dependiendo de los puntos de proceso y los tiempos del ciclo. Además, hay variables del molde que también son importantes, como el espesor de la cavidad, la longitud de la trayectoria del flujo, la posición, el diseño y las dimensiones

de las entradas, el sistema de refrigeración, la sección y longitud de los canales de alimentación, entre otros.

A pesar de que las máquinas indican la presión y la temperatura, estos valores no son los que realmente soporta el polímero, ya que varían según el tipo y la masa del polímero, el tiempo de permanencia, la velocidad de producción, el tipo de máquina y el diseño del molde, entre otros factores.

El aumento de la temperatura del polímero produce dos efectos: disminuye la viscosidad y aumenta el volumen debido a la expansión térmica. Por otro lado, el aumento de presión, siempre y cuando no sea excesivo, aumenta ligeramente la viscosidad y disminuye el volumen del fundido debido a la compresión. (Angita D. , Ramon , 1975).

1.4.2.3.3. Moldeo en vacío. El moldeo por vacío es un método de fabricación que se usa para dar forma a materiales de plástico y es utilizado en cocinas, en electrónica, medicina, etc. La técnica de termoformado al vacío es un proceso conformado por láminas de plástico que consiste en varias etapas. En primer lugar, se calienta una lámina de plástico hasta que adquiere una temperatura adecuada para su conformación. Luego, se traslada la lámina caliente a un molde que tiene la forma deseada para el producto final.

En la siguiente etapa, se procede a generar un vacío entre la lámina y el molde, lo que permite que la lámina se ajuste a la forma del molde. Este proceso se realiza mediante el uso de una bomba

de vacío que extrae el aire entre la lámina y el molde. Una vez que se ha formado el vacío, se espera a que la lámina se enfríe y se solidifique, lo que asegura la forma del producto final.

Finalmente, se separa el plástico del molde con cuidado para evitar dañar la forma final del producto. Este proceso se realiza con la ayuda de herramientas de corte y separación específicas, lo que permite obtener productos con alta precisión y acabado. (Zurita, 2022).

1.4.2.3.4. Moldeo por soplado. El moldeo por soplado de plástico es un proceso de fabricación que consiste en inflar una preforma de plástico mediante aire comprimido para crear objetos huecos de plástico. Según el autor A. Brent Strong (2006), quien publica en el libro "Plastics Materials and Processing" de "el moldeo por soplado es un proceso de conformado de plástico en el que una masa de plástico se moldea en una forma hueca mediante la aplicación de aire comprimido". (Strong, 2006). Es decir que en este proceso se utiliza comúnmente para la fabricación de botellas, recipientes y otros objetos huecos de plástico en grandes volúmenes.

1.4.2.3.5. Impresión 3d. La impresión 3D permite la creación de objetos mediante la adición y unión controlada de diferentes tipos de materiales a partir de los datos de un modelo en tres dimensiones. Esta técnica, que se lleva a cabo normalmente capa sobre capa según la norma ASTM International 203AD, ofrece la posibilidad de imprimir objetos con geometrías más intrincadas, cambios y personalizaciones, lo que permite la fabricación de diseños complejos en un solo paso y con una reducción del desperdicio de material al prescindir de moldes y algunos postprocesos en las piezas. Además, la impresión 3D acelera y simplifica la innovación en producto, lo que no solo resulta en ventajas en costes, sino también en la eliminación de barreras en las cadenas de

suministro y en la participación del cliente en el diseño, tal como destacan (Weller, Kleer, y Piller 2015).

1.4.2.4 Maquinas trituradoras.

1.4.2.4.1. Trituradora de mandíbula. Existen diferentes tipos de trituradoras, incluyendo las de impacto, molinos de martillos y cono, pero una de ellas es la trituradora de mandíbula, que se utiliza en diversos procesos como la recuperación de pavimento asfáltico, el reciclado de concreto con refuerzo de barras, y la trituración de minerales agregados, entre otros. En general, las trituradoras pueden clasificarse en dos tipos: por compresión o por impacto. Las trituradoras de mandíbula y de cono utilizan la fuerza de compresión para procesar los materiales, mientras que las de impacto y las de molinos de martillos utilizan la fuerza de impacto.

Según el Autor Smith et al., (2013), quien publica en la revista "*Minerals Engineering*" el artículo "*Crushing Plant Design and Layout Considerations*", la trituradora de mandíbula es ampliamente utilizada en diversas aplicaciones, como la minería, la construcción, el reciclaje de demolición, entre otras. Su diseño se enfoca en procesar un tamaño grande de alimentación y en soportar el desgaste del material abrasivo.

La trituradora de mandíbula está compuesta por dos placas de mandíbula, una fija y otra móvil, que forman una cámara en forma de V en la que los materiales se Trituran varias veces. Estas placas pueden tener una apariencia corrugada o lisa, dependiendo del diseño específico de la trituradora. (smith et (2013)).

1.4.2.4.2. Trituradora de impacto hidráulico. La trituradora de impacto es una máquina que utiliza la energía de un impacto o golpe para romper el material. En general, estas máquinas proporcionan curvas mejor graduadas y un buen factor de forma en comparación con las machacadoras de mandíbulas. Sin embargo, no son adecuadas para materiales abrasivos a menos que sean muy blandos, ni para materiales duros, a menos que tengan una textura estratificada (Piqueras, 2013).

Hay dos tipos fundamentales de machacadoras de impacto: de barras de choque y de martillo. En las primeras, las barras alargadas, fijas y paralelas al rotor, de sección rectangular, actúan como elementos percutores. En las segundas, una colección de martillos situados a lo largo de varios ejes en la periferia del rotor actúa como elemento de percusión.

Aunque existen varios modelos de trituradoras de impacto, básicamente constan de una carcasa más o menos cúbica, una cámara de trituración, y un eje que se apoya mediante rodamientos en dos de sus caras laterales opuestas. El rotor, que aloja los elementos de percusión, está abrazando al eje y golpea y lanza el material dentro de la cámara de impacto contra las placas de choque, que están situadas en la cara superior y frontal.

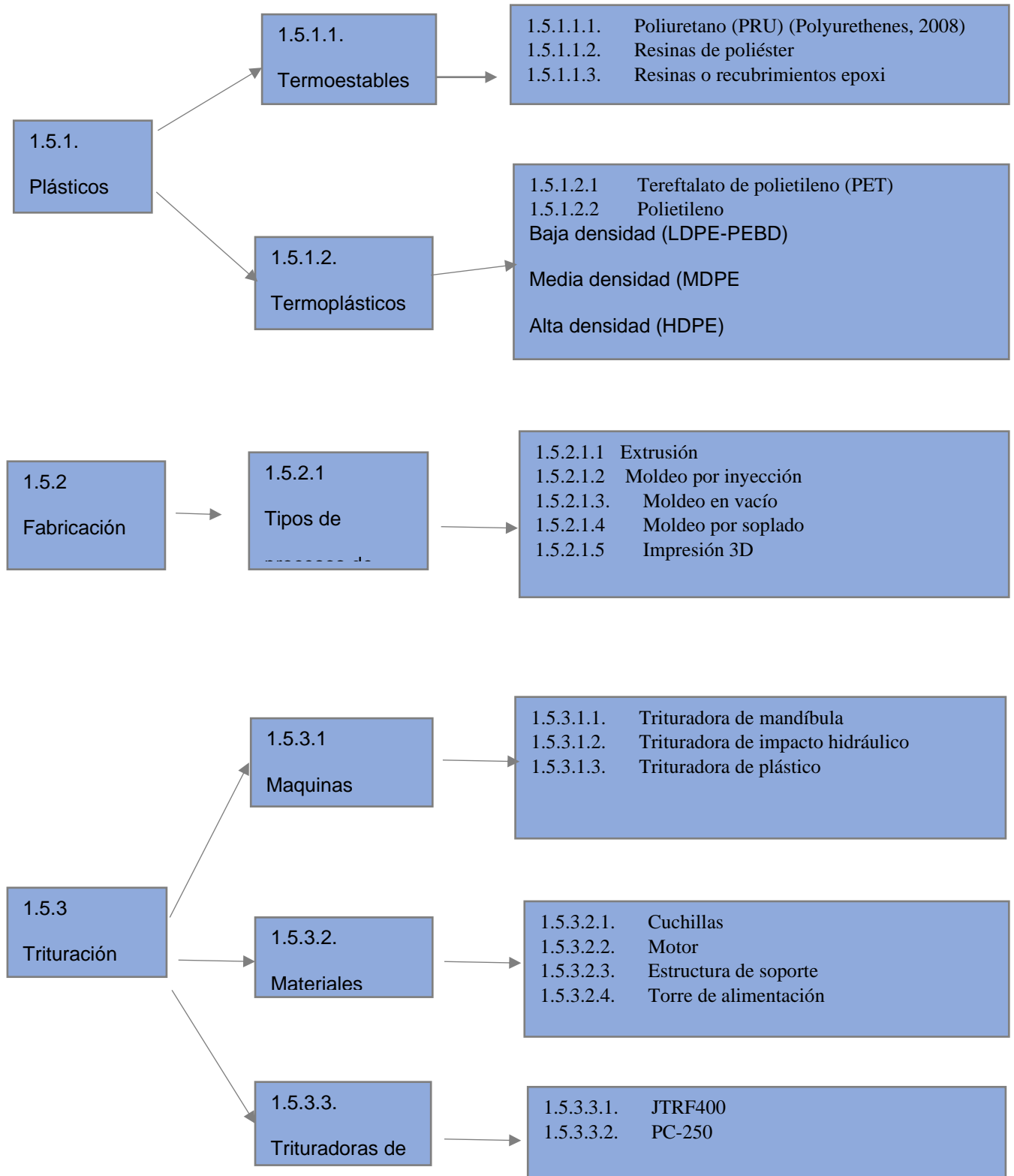
1.4.2.4.3. Trituradora de plástico. El reciclaje de materiales plásticos ha ganado importancia con el tiempo y la molienda de estos materiales es una etapa crucial en el proceso. Anteriormente, la molienda de plásticos no era considerada una operación tecnológicamente avanzada, sin embargo, en la actualidad se han desarrollado equipos de alta eficacia para procesar grandes cantidades de material (Medina, 2011). La molienda del Polietileno de Tereftalato (PET) se lleva a cabo en un molino de cuchillas giratorias que trituran las botellas para convertirlas en hojuelas

Desarrollo de un prototipo de máquina trituradora y extrusora de plástico

de tamaño específico. Estas cuchillas están unidas a porta cuchillas, que a su vez se unen a un eje rotatorio mediante cuñas colocadas sobre un par de chumaceras. En uno de los extremos del eje se acopla un volante de inercia que almacena energía para moderar las fluctuaciones de velocidad al triturar el PET. En el otro extremo, se encuentra una polea que forma parte del sistema de transmisión de potencia.

Figura 2.

Taxonomía



1.4.4 Marco conceptual

En primer lugar, se presenta revisión teórica sobre los materiales plásticos y el reciclaje de estos y algunas características físicas propias que tendremos en cuenta para la realización de este proyecto. Después en segundo lugar, se mencionan los procesos que se realizarán para el procesamiento de plástico y la transformación de este. Y finalizando en tercer lugar, se mencionan algunas de las características de los materiales plásticos tenidos en cuenta en los procesos de transformación de este tipo de materiales y finalizar con los temas de rugosidad como parámetro de calidad de las impresiones usado en este trabajo.

1.4.4.1. Origen y evolución del plástico. En 1860 el inventor norteamericano Wesley Hyatt, desarrolló un método de tratado previamente con alcanfor y una cantidad mínima de disolvente de alcohol dando así origen al plástico. Este producto, fue patentado con el nombre de celuloide (material plástico muy flexible empleado en la industria cinematográfica), el cual tuvo un notable éxito comercial, a pesar de ser considerado como inflamable y su visible deterioro a la exposición con la luz (Rocha, Perez, & Villanueva, 2020).

El celuloide se fabricaba disolviendo celulosa, un hidrato de carbono obtenido de las plantas en una solución de alcanfor y etanol, es así que se inicia la fabricación de distintos objetos como: mangos de cuchillas, armazones de lentes y películas cinematográficas. (Villarreal, 2011), aquí es importante recalcar que una de las características principales del celuloide es que podría ser ablandado repetidamente y moldeado de nuevo mediante la utilización del calor, por lo que recibe el calificativo de termoplástico.

Durante los años subsiguientes de la posguerra se mantuvo el elevado ritmo de los descubrimientos y desarrollo de la industria de los plásticos, es así que, en 1953 el químico alemán Karl Ziegler, realizó avances sobre el polietileno, teniendo un especial interés en avances de plásticos técnicos, como los policarbonatos y los acetatos. (Ziegler, 2020). A partir de esto se

utiliza para generar compuestos que sirven para cascos de seguridad, aparatos sometidos a altas temperaturas y muchos otros productos empleados en lugares con condiciones ambientales extremas.

El plástico se produce masivamente debido a su alta utilidad para el ser humano, es por esto que el plástico ha tenido evolución desde los años de 1860, el cual al principio fue utilizado para reemplazar el marfil en bolas de billar, lo cual llevó a grandes investigaciones que permitieron la producción y evolución de materiales reciclados con el plástico. Infortunadamente, es reconocido el impacto ambiental que generan los residuos plásticos. Por ello se sigue investigando sobre biopolímeros que puedan degradarse y minimicen el impacto ambiental.

1.4.4.2. Reciclaje de materiales plásticos. La base de este proyecto se encuentra en la transformación del plástico obtenido de los recipientes reciclados para generar filamento plástico extruido. La atención se centra en el **PET**, el polietileno de alta densidad **HDPE**, el polipropileno **PP** que se encuentran en elementos de uso cotidiano en nuestra sociedad. Cuando se habla de reciclaje de plásticos existen diferentes tipos de reciclaje llamados primario, secundario y terciario.

El primario tiene que ver con la utilización de partes de plástico, con los cuales se pueden obtener partes ensambladas que son obtenidos por el recorte del material original. Por otra parte el secundario es el más empleado y se refiere a la fusión de los desechos que son convertidos en productos de diferentes formas. No obstante el terciario es un proceso de tipo químico, que consiste en el aprovechamiento de los componentes químicos del plástico.

Existen una gran cantidad de tipos de plásticos, debido a que estos materiales poseen diferentes procesos de reciclaje, normalmente se codifican con un número dentro de un triángulo, según el

SPI (Sistema de identificación de plásticos). Dentro de estos se encuentra el **Tereftalato de polietileno (PET)**, codificado con el número **1**, este es utilizado en envases de bebidas, cosméticos, fibras textiles, películas radiográficas, entre otras aplicaciones similares a estas. Otro de los plásticos de uso muy común es el **Polietileno de alta densidad (PEAD)**, este es utilizado comúnmente en envases de aceites para vehículos, detergentes, bolsas para supermercados, baldes para pinturas, tuberías para gas, drenajes y usos sanitarios. El polipropileno está codificado con el número **5** y el **polietileno** con el número **6**. El grupo 7 pertenece a aquellos plásticos cuyo proceso de reciclaje es mucho más complejo y por eso recibe el nombre de “OTROS” (Hachi & Rodriguez, 2010).

1.4.4.3 Clasificación de los plásticos reciclables. En la figura 3 se puede observar la clasificación de los plásticos reciclables.

Figura 3.

Clasificación de los plásticos reciclables



Fuente: (Evaselia, 2017)

1.5 Metodología

1.5.1 Tipo de Investigación

El tipo de investigación es cuantitativa, recoge, procesa y analiza datos numéricos sobre las variables de investigación.

1.5.2 Línea de investigación

En Ingeniería Mecatrónica la línea de investigación es Desarrollo Mecatrónico. La sublínea en la que se enmarca este proyecto es Diseño de Productos y Procesos. Esto se baso teniendo en cuenta el libro de (Ulrich, 2012).

1.5.3 Hipótesis de la investigación

1.5.3.1 Hipótesis investigación: El diámetro del filamento obtenido de la extrusora de plástico es ideal para la impresión 3D. El diámetro del filamento utilizado en la impresión 3D es un factor determinante para obtener resultados óptimos en términos de calidad y precisión. Se plantea que, si el diámetro del filamento se encuentra en un rango específico, entonces las impresiones 3D serán más exitosas en términos de acabado, resistencia y fidelidad a los diseños originales.

1.5.3.2 Hipótesis alternativa: El diámetro del filamento obtenido de la extrusora de plástico no es ideal para la impresión 3D. El rango específico del diámetro del filamento no tiene un impacto significativo en la calidad y precisión de las impresiones 3D. El diámetro del filamento utilizado en la impresión 3D no es un factor determinante para obtener resultados óptimos en términos de calidad, precisión, acabado, resistencia y fidelidad a los diseños originales.

1.5.3.3 Hipótesis nula: No existe una relación significativa entre el diámetro del filamento obtenido de la extrusora de plástico y la calidad y precisión de las impresiones 3D. Es decir, el

rango específico del diámetro del filamento no tiene un impacto en el acabado, resistencia y fidelidad a los diseños originales de las impresiones 3D.

1.5.4 Descripción metodológica

1.5.4.1 Fase 1. Diseño de los componentes mecánicos y electrónicos que conforman en prototipo. En esta fase es importante investigar sobre las máquinas trituradoras y extrusoras de plástico que pueden servir de referencia para el diseño y fabricación del prototipo. En este punto se propondrán alternativas de diseño, las cuales se evaluarán y permitirán obtener el diseño óptimo.

Para el diseño de la trituradora, se utilizarán las siguientes ecuaciones:

- **Cálculo de la fuerza de corte (F):**

$$F = \tau * A$$

Donde τ es la resistencia al corte del material y **A** es el área de corte.

- **Cálculo de torque (T):**

$$T = F * r$$

Donde **r** es el radio del eje sobre el cual actúa la fuerza.

Estas ecuaciones sirven para determinar las especificaciones mecánicas necesarias para el diseño de las cuchillas y el eje de la trituradora.

Asimismo, se harán uso extensivo de herramientas de síntesis y análisis como diagramas, bocetos, cálculos, simulaciones para completar el diseño y selección de componentes. Al finalizar la etapa de diseño se obtendrán los planos de fabricación y lista de materiales para llevar a cabo la construcción del prototipo en la siguiente fase.

1.5.4.2 Fase 2. Clasificación de materiales y construcción del prototipo. En esta fase se cotizan componentes comerciales, se fabrican componentes específicos y se ensamblan. Al final de este proceso se tendrá el prototipo construido de acuerdo al diseño.

1.5.4.3 Fase 3. Pruebas y análisis del funcionamiento. En esta fase se hacen pruebas de los componentes en vacío, así como del prototipo ensamblado. Se verificará también el funcionamiento con la materia prima.

Las pruebas incluirán:

- **Pruebas de resistencia mecánica:** Utilizando la fórmula $\sigma = \frac{F}{A}$, donde σ es la resistencia, F es la fuerza aplicada y A es el área de la sección transversal.
- **Pruebas de durabilidad:** Mediante ciclos de operación continuos para evaluar el desgaste y la eficiencia operativa del prototipo.
- **Pruebas de eficiencia energética:** Evaluando el consumo de energía durante el proceso de trituración y extrusión, comparado con estándares industriales. Se registrará la cantidad de energía eléctrica consumida durante el procedimiento de trituración utilizando un medidor de energía. La prueba se llevará a cabo registrando la lectura inicial y final del medidor de energía antes y después de operar la máquina durante 1 hora.
- **Pruebas de tamaño de partículas:** Mediremos el tamaño de las partículas del PET triturado utilizando un tamiz o un analizador de partículas. La prueba se realizará tomando una muestra representativa del PET triturado y pasando la muestra por una serie de tamices de diferentes tamaños o usando un analizador de partículas para obtener una distribución del tamaño de las partículas. Los tamaños deseados de las partículas pueden variar dependiendo del uso final, pero generalmente buscamos partículas que estén entre 1 mm y 5 mm para asegurar su adecuado procesamiento en impresoras 3D y otros equipos de fabricación.

Los criterios a evaluar serán:

- **Calidad del filamento producido:** Medido en términos de consistencia del diámetro y resistencia del material.
- **Eficiencia del proceso:** Comparando la cantidad de material procesado con el tiempo y energía invertidos.
- **Tiempo de operación:** Registrar el tiempo total que va a estar funcionando la máquina. Este proceso nos ayudará a realizarle un seguimiento y poder plantear un mantenimiento adecuado.
- **Seguridad operativa:** Asegurando que el prototipo funcione sin riesgos para los operadores y cumpla con las normativas de seguridad industrial.

Se harán mediciones del filamento obtenido para verificar si cumple con las especificaciones necesarias para usarlo en impresoras 3D. En caso de no cumplir, se harán ajustes al proceso, lo que puede involucrar diseñar o rediseñar algunos componentes. Finalmente, cuando el prototipo funcione satisfactoriamente, se redactará el manual de usuario con las recomendaciones para la operación.

1.5.5 Validez de la investigación

1.5.5.1 Condiciones de la recolección de datos

1.5.5.1.1 Prototipo de máquina trituradora de PET.

- **Cantidad de PET triturado:** Medir, pesar y registrar la cantidad de PET triturado en un tiempo determinado. Con esto podremos tener una idea de la cantidad de producción.
- **Tamaño de las partículas:** Mediremos el tamaño de las partículas del PET triturado utilizando un tamiz o un analizador de partículas. La prueba se realizará tomando una muestra representativa del PET triturado y pasando la muestra por una serie de tamices de diferentes tamaños o usando un analizador de partículas para obtener una distribución del tamaño de las partículas. Los tamaños deseados de las partículas pueden variar dependiendo del uso final, pero generalmente buscamos partículas que estén entre 1 mm y 5 mm para asegurar su adecuado procesamiento en impresoras 3D y otros equipos de fabricación. Esta recolección de datos nos sirve para verificar si estamos logrando el tamaño deseado de la partícula para el siguiente proceso.
- **Consumo de energía:** Registrar la cantidad de energía eléctrica consumida durante el procedimiento de trituración utilizando un medidor de energía. La prueba se llevará a cabo registrando la lectura inicial y final del medidor de energía antes y después de operar la máquina durante 1 hora. Estos datos nos permitirán calcular el consumo total de energía y, a partir de ahí, controlar los costos de energía ajustando el tiempo de operación y la eficiencia del proceso. En los resultados, se presentarán gráficos comparativos del consumo de energía y se analizarán las posibles optimizaciones para reducir los costos operativos.
- **Tiempo de operación:** Registrar el tiempo de total que va a estar funcionando la máquina, este proceso nos ayudara a realizarle un seguimiento y poder plantear un mantenimiento adecuado.

1.5.5.1.2. Prototipo de extrusora de filamento PET

- **Temperatura:** Medir y registrar la temperatura en diferentes puntos del prototipo como en la parte de la alimentación, de fusión y la boquilla de salida. Con esto nos aseguraremos de que estamos alcanzando la temperatura para lograr fundir el PET y lograr obtener el filamento con éxito.
- **Presión:** Utilizar un sensor de presión digital, como un transductor de presión piezoeléctrico o un manómetro digital, que nos permita medir la presión durante el proceso.

Estos sensores nos ayudarán a controlar y ajustar la presión para obtener una extrusión uniforme y tener constante la salida de filamento. En los resultados, se documentarán los sensores que demostraron ser más efectivos en el control de la presión.

- **Diámetro del filamento:** Se medirá el diámetro del filamento extruido utilizando un medidor de diámetros bueno con esto verificaremos si el diámetro del filamento es deseado y que cumpla con las especificaciones para ser utilizado en impresoras 3d ya que si no cumple con las especificaciones se harán ajustes necesarios.
- **Rendimiento y calidad:** Se realizarán pruebas de calidad tales como pruebas de resistencia, elongación y diámetro. Estas pruebas son útiles para evaluar la calidad del filamento y realizar mejoras si es necesario. Las fórmulas utilizadas incluyen:
 - **Resistencia a la tracción:** Utilizando la fórmula $\sigma t = \frac{F}{A}$, donde σt es la resistencia a la tracción, **F** es la fuerza aplicada y **A** es el área de la sección transversal del filamento. Esta prueba es útil para determinar la capacidad del filamento para soportar cargas sin romperse.
 - **Elongación:** Utilizando la fórmula $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$, donde ϵ es la elongación, ΔL es el cambio en la longitud del filamento y L_0 es la longitud original, Esta prueba es útil para determinar la ductilidad del filamento, es decir, cuánto puede estirarse antes de romperse.
 - **Diámetro:** Se medirá el diámetro del filamento extruido utilizando un medidor de diámetros. Esta prueba es útil para verificar si el diámetro del filamento es el deseado y cumple con las especificaciones para ser utilizado en impresoras 3D. Si no se cumple con las especificaciones, se harán ajustes necesarios.
- **Selección de muestras:** Se seleccionarán diferentes muestras de filamento obtenido de la extrusora de plástico con diferentes diámetros dentro del rango específico de interés.
- **Diseño experimental:** Se establecerá un diseño experimental adecuado para el estudio, que puede incluir la impresión de objetos de prueba con diferentes tamaños de filamento. Es importante mantener constantes otros parámetros de impresión, como la temperatura, velocidad de impresión y configuraciones de capas.

- **Proceso de impresión:** Se realizarán impresiones 3D utilizando una impresora de alta calidad y precisión. Se asegurará que el entorno de impresión sea controlado y constante para minimizar la variabilidad externa.
- **Variables a medir:** Se recopilarán datos cuantitativos relacionados con la calidad y precisión de las impresiones 3D. Estas variables pueden incluir dimensiones, acabado superficial, resistencia mecánica y comparaciones visuales con los diseños originales. Se utilizarán herramientas de medición adecuadas para obtener resultados precisos. Los resultados incluirán análisis de estas variables para evaluar el rendimiento del filamento y la calidad de las impresiones 3D.

1.5.5.1.3 Pruebas que podemos obtener:

Bueno las pruebas que podemos obtener del prototipo de máquina trituradora son:

- **Capacidad de trituración:** aquí vamos a determinar la cantidad de PET que el prototipo va a poder triturar en un tiempo determinado donde podremos medir el peso o el volumen del PET triturado en el tiempo establecido
- **Eficiencia de trituración:** Aquí vamos a evaluar que tan bien va ser el proceso de trituración del PET en partículas pequeñas y homogéneas.
- **Consumo de energía:** Aquí vamos a medir el consumo de energía que el prototipo de trituradora consumirá mientras realiza el proceso de trituración.
- **Seguridad:** Vamos a verificar que el prototipo cumpla con los requisitos de seguridad como son interruptores de emergencia, sistema de parada automática.

Para el prototipo de maquina extrusora realizaremos las siguientes pruebas:

- **Calidad del filamento:** Tendremos en cuenta la calidad del filamento de PET aquí evaluaremos su diámetro, uniformidad, resistencia mecánica.
- **Velocidad de extrusión:** Mediremos a qué velocidad produce filamento de PET la extrusora y de buena calidad ya que con esto también evaluaremos tanto la velocidad de

alimentación del PET triturado como también evaluares la velocidad de la salida del filamento de PET.

- **Estabilidad del proceso:** Aquí verificaremos la consistencia y estabilidad del proceso de extrusión con esto debemos asegurarnos de la temperatura, la presión y otros parámetros que estén dentro del rango requerido durante el proceso de extrusión.

- **Consumo de energía:** Aquí al igual que la trituradora mediremos el consumo de energía de la extrusora para así poder evaluar su eficiencia energética.

- **Seguridad:** Asegurarnos de que la extrusora cumpla con los siguientes estándares de seguridad como la protección para evitar el acceso a las partes móviles, también un sistema de parada de emergencia y alguna protección contra el sobrecalentamiento.

2. Presentación de resultados

2.1 Resultados de acuerdo a los objetivos

2.1.1 Resultados del objetivo 1

En este objetivo tuvimos en cuenta las alternativas de diseño. Se hizo el análisis de las alternativas que mejor se adapten a nuestro propósito. También se realizaron cálculos matemáticos de los dos prototipos.

Tabla 4

Especificaciones de desempeño

Voltaje	110v AC
Costo	Inferior a \$ 1.500.000
Material de trituración	Botellas PET
Potencia	Máxima 1hp
Velocidad de procesamiento	Entre 1kg a 4kg por hora

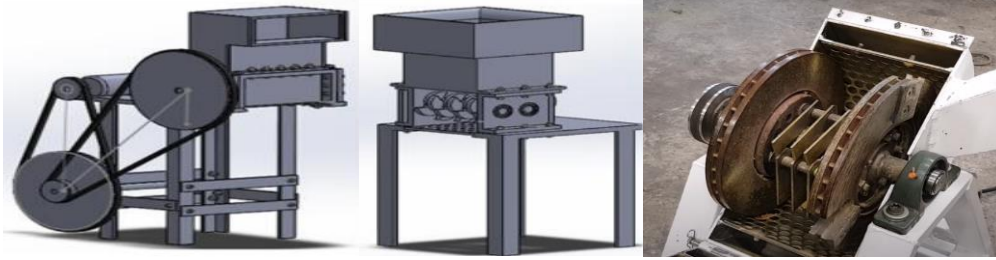
2.1.1.1 Componentes de trituradora

- **Motor:** Este será el encargado de proporcionar la potencia necesaria para hacer funcionar la trituradora será un motor eléctrico de corriente alterna (AC).
- **Cuchillas:** Estas son los principales componentes responsables de cortar y triturar el PET tendrá cuchillas giratorias y fijas montadas en un rotor o en una placa la cantidad de las cuchillas puede variar según a nuestra necesidad y diseño.
- **Tolva de alimentación:** Aquí es donde se colocará el PET para ser alimentado en la trituradora este tendrá una forma y un tamaño adecuado para así facilitar la carga y el flujo del material sea fácil para que así llegue rápido a las cuchillas donde será posteriormente triturado.
- **Sistema de transmisión:** Se encarga de transmitir el movimiento del motor hacia las cuchillas para hacerlas girar. Este puede tener correas, poleas, engranajes, u otros componentes mecánicos que nos permitan una transmisión eficiente de potencia.
- **Estructura:** Tendrá soporte y protección para los componentes interno de la trituradora esta estructura puede ser fabricada con materiales resistentes y duraderos como podría ser el acero o aluminio para así garantizar una buena estabilidad y una gran seguridad durante el proceso de trituración.
- **Sistema de control:** Este sistema tendrá interruptores, botones o dado el caso un panel de control para el encendido y para apagar la maquina así también como para poder controlar su funcionamiento donde podría ser un sistema de control manual o electrónico.
- **Sistema de recolección y almacenamiento:** Este puede tener una caja o bandeja receptora para así poder recolectar el PET triturado ya que esto nos facilitara la manipulación del PET triturado.
- Se proponen unas alternativas de diseño de la trituradora y de la extrusora de filamentos 3D.

2.1.1.2 Alternativas de diseño de trituradora. Se proponen unas alternativas de diseño de la trituradora. Para la trituradora escogemos 3 alternativas que más se adapten:

Figura 4 *Alternativas de diseño de trituradora*

A) Trituradora un eje B) Trituradora con martillos C) Trituradora 2 ejes



Fuente: Harold D. Unigarro

Fuente: JM INdustrial

En la siguiente tabla encontramos las características de las trituradoras, también las ventajas y desventajas de cada una.

Tabla 5 *Ventajas y desventajas de las alternativas*

Tipo de trituradora	Ventajas	Desventajas
Alternativa 1 trituradora de martillos	<ul style="list-style-type: none"> • Son de gran resistencia • Trituración rápida • Flexibilidad en los materiales • Reducción del volumen de los plásticos 	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste acelerado de los martillos • Uso de energía elevado • Alto costo de fabricación • Son muy ruidosas
Alternativa 2 trituradora con cuchillas 1 eje	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiente en la reducción de tamaño • Menor costo inicial • Es el que más utilizan las recicladoras de plástico de pequeñas empresas de plástico • Buen rendimiento al procesar plástico 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitaciones de capacidad • Menor duración de las cuchillas • Ruido medio • El material se estanca
Alternativa 3 trituradora con cuchillas 2 ejes	<ul style="list-style-type: none"> • Versatilidad • Eficiente • Bajo costos de mantenimiento • Tritura grandes cantidades en trozos bien pequeños 	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo energético alto • Costo inicial alto • Vibraciones

- Mantenimiento costoso a largo plazo

Tabla 6 Matriz de selección

Modelo de trituradora	Costo (pesos colombianos)	Velocidad de producción(kh/h)	Consumo de corriente (Kw/h)	Ruido(dB)
Ponderación(P)	40%	30%	10%	20%
Alternativa 1 trituradora de martillos	\$2.300.000	10kg - 9Kg	20kWh	60dB – 70dB
Alternativa 2 trituradora con cuchillas 1 eje	\$1.900.000	8Kg – 9Kg	18kWh	45dB – 50dB
Alternativa 3 trituradora con cuchillas 2 ejes	\$2.350.000	11Kg – 10Kg	21kWh	50dB – 60dB

Se tiene en cuenta la tabla anterior las ventajas y desventajas de los diferentes diseños presentados, se presenta una valoración para cada diseño en aspectos como: Costo, velocidad de producción, consumo de corriente y ruido. Con la calificación de estos aspectos se selecciona 1 diseño.

Los puntajes para cada alternativa se toman valores entre 1 a 5. 1 siendo la opción no deseada y 5 cumple con lo deseado y 3 que la alternativa cumple lo que podemos acceder.

2.1.1.1 Resultados de la evaluación. Esta evaluación se realizó teniendo en cuenta las investigaciones que se hizo acerca de las trituradoras que mejor se adapten a la trituración del plástico en trozos pequeños.

Se comparó con máquinas hechas y se estimó la que mejor se adapte a la extrusora dándole valores a los factores(alternativas) del 1 al 10. La ponderación la tomamos dándole porcentajes a las características que son más accesibles a los autores. En la siguiente tabla está el resultado final evaluado con el factor de ponderación y así nos da el diseño final. Siendo 10 la mejor opción, 5 más o menos y 0 no es la opción.

Se saca la ponderación de cada aspecto y elegimos la que mayor se adapte.

Tabla 7 *Ponderación de cada aspecto*

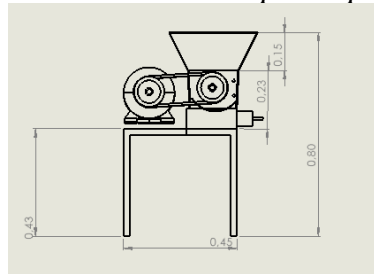
Modelo de trituradora	Costo (pesos colombianos)	Velocidad de producción (kg/h)	Consumo de corriente (Kw/h)	Ruido (dB)	Total
Alternativa 1 trituradora de martillos	2.4	2.4	0.5	1	6.3
Alternativa 2 trituradora con cuchillas 1 eje	3.2	2.1	0.6	1.4	7.3
Alternativa 3 trituradora con cuchillas 2 ejes	2	2.7	0.4	1.2	6.3

Observando los resultados la alternativa que más se adapta a las características que necesitamos es la Alternativa 1

Observando los resultados de la tabla se determina que la alternativa 2 que es la trituradora de un eje es la que mayor valoración tiene y la que mejor se adapta a nuestro propósito, esta es la que se va diseñar y a construir.

2.1.1.2 Boceto del diseño del prototipo de trituradora PET (Dimensiones en metros).

Figura 5. *Boceto del diseño del prototipo de trituradora PET.*



2.1.1.3 Cálculos de la trituradora.

2.1.1.4 Cálculo de Fuerza, Torque y Potencia en Eje con Cuchillas. A continuación, se calcula el área del material PET con la cual va a estar en contacto la cuchilla al momento de realizar el corte.

$$A = w \times t$$

Donde A es el área de corte del borde de la cuchilla, w es el ancho del filo del corte y t es el espesor de la botella de PET. En este caso w es igual a 10 mm y t es 0.3 mm, así A es igual a 3mm^2 .

Resistencia al corte de plástico PET = **58.6 MPa**

2.1.1.5 Fuerza que actúa sobre el borde de la cuchilla. Con la siguiente ecuación se realiza el cálculo de la fuerza que necesita la cuchilla para realizar el corte al plástico PET.

$$R = \frac{F}{A}$$

Donde R es resistencia al corte igual a 58.6 MPa, A área que es 3mm² y con estos datos se puede encontrar

- $F = R * A = 58.6 \text{ MPa} * 3\text{mm}^2 = 175.8\text{N}$
- F= 175.8 N - Fuerza en una cuchilla

Debido a que todas las cuchillas no van a actuar al mismo tiempo porque están ubicadas de manera que solo la mitad pueda trabajar de manera simultánea, los cálculos se van a realizar para una fuerza aplicada en 8 cuchillas.

- $F_t = 175.8 \text{ N} * 8$ – fuerza en todas las cuchillas
- 1406.4N – fuerza total en todas las cuchillas

Utilizando la siguiente ecuación se realiza el cálculo del torque provocado entre la cuchilla y el eje en el instante que se realiza el corte en el plástico PET

$$T = F \times Dp$$

En este caso F = 1406.4N, Dp distancia perpendicular desde el centro de la cuchilla hasta el borde igual a 0,05m, y T que es torque encontrado igual a 84.4N*m.

$$T = 84 \text{ N} \times m$$

2.1.1.6 Potencia requerida. Considerando el modo de operación de trituradoras que procesan materiales similares al PET, se ha constatado que las cuchillas deben tener una velocidad reducida para lograr un corte eficiente. Para este diseño en particular, se empleará una velocidad específica en la siguiente ecuación, a fin de calcular la potencia necesaria 60 rpm (Vela, Rey, & Jaimes, 2018).

Velocidad requerida: N = **60 rpm**

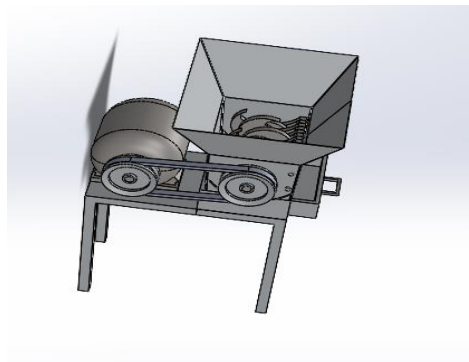
$$P = \frac{2 \times \pi \times N \times T}{60000}$$

$$P = \frac{2 \times \pi \times 60 \times 84.4}{60000} = 0.53 \text{ Kw}$$

Transformando a caballos de potencia es igual a 0.71 hp, entonces se hace una aproximación y la potencia que se va a utilizar será de 1 hp.

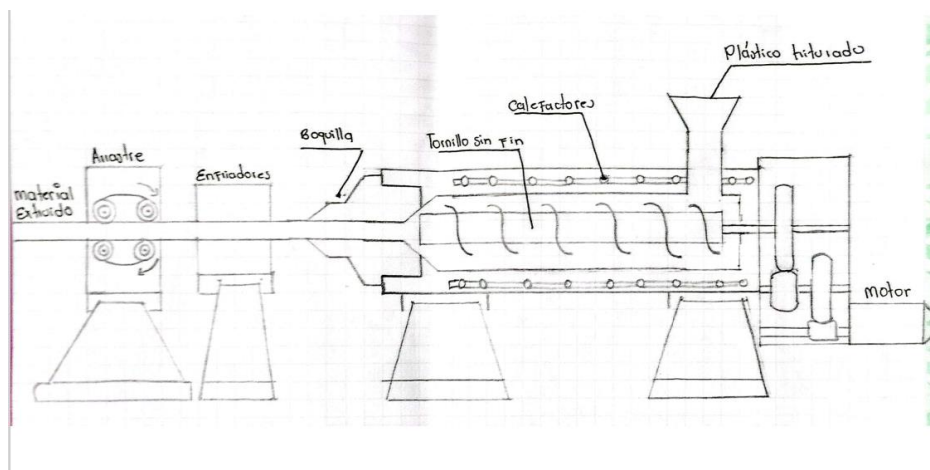
2.1.1.7 Ensamblaje de la trituradora de cuchillas de un eje.

Figura 6. Ensamblaje de la trituradora de cuchillas de un eje



2.1.1.8 Bosquejo de la extrusora y partes.

Figura 7. Boceto del diseño de la extrusora.



2.1.1.8.1. Tornillo de extrusión: Este es el componente más importante en la extrusora ya que es el que se encarga de empujar y fundir el PET a medida que va avanzando a lo largo del cañón o cilindro este está fabricado en acero resistente al calor.

2.1.1.8.2. Cañón o cilindro: Es un cilindro donde se alberga el tornillo de extrusión este va a ser diseñado para resistir altas temperaturas y presiones. Este cañón o cilindro va tener unas resistencias eléctricas para calentar el PET y termocuplas para medir la temperatura y así se facilita la extrusión.

2.1.1.8.3. Motor: Se encargará de proporcionarle la energía necesaria para hacer girar el tornillo este será un motor eléctrico de corriente alterna (AC).

2.1.1.8.4. Sistema de alimentación: Aquí es donde se alimentará la extrusora con el PET triturado que irá al tornillo de extrusión de manera constante este sistema de alimentación será por medio de una tolva de carga.

2.1.1.8.5. Control de temperatura: Este control es importante para mantener la temperatura adecuada en el cañón o cilindro y el tornillo de extrusión. Este tendrá termopares, sondas de temperatura y controladores de PID (Proporcional, Integral y Derivativo). Todo esto será para garantizar una temperatura constante mientras dura el proceso de extrusión.

2.1.1.8.6. Zona de enfriamiento: Este proceso será después de que el filamento de PET se extruye del cañón o cilindro, ya que necesita enfriarse rápidamente para solidificarse. Esta zona de enfriamiento incluirá ventiladores o un sistema de refrigeración para así poder garantizar una solidificación adecuada y evitar deformaciones en el filamento.

2.1.1.8.7. Sistema de enrollado: Una vez que el filamento este solidificado debe ser enrollado de manera controlada mediante un mecanismo de enrollamiento o embobinado para que sea uniforme y libre de tensiones.

2.1.1.8.8. Controladores y paneles de control: Ya que esto incluirá dispositivos electrónicos tales como controladores de temperatura, de velocidad del motor y pantalla de visualización para poder monitorear o ajustar algunos parámetros durante la extrusión.

2.1.1.9 Cálculos extrusora

2.1.1.9.1. Longitud del husillo: Se decidió tomar una longitud de 0,4 metros basados en los parámetros de relación longitud-diámetro (L/D) que son más común utilizados en el diseño de husillos para extrusión. La relación L/D adecuada para este tipo de extrusora es de aproximadamente 20:1. Dado que el diámetro del husillo es de 20 mm, la longitud se calcula como:

$$\text{Longitud} = \text{Diámetro} * \frac{L}{D} = 20\text{mm} * 20 = 400\text{mm} = 0.4\text{m}$$

2.1.1.9.2. Diámetro: Aquí usaremos la siguiente fórmula para determinar el diámetro del husillo:

$$D = \frac{0.4\text{m}}{20} = 0.02\text{m}$$

2.1.1.9.3. Número de filetes: Con la siguiente fórmula calculamos lo números de filetes:

$$\text{No. de filetes} = \frac{L}{D} = \frac{0.4}{0.02} = 20 \text{ filetes}$$

2.1.1.9.4. Ángulo de hélice: Determinamos el diámetro del husillo.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{1}{\pi} = 17.6$$

2.1.1.9.5. Tolerancia Tornillo / Cilindro: Con la siguiente fórmula calculamos la tolerancia/cilindro.

$$= 0.002 \times 0.02 = 0.00004\text{m}$$

2.1.1.9.6. Ancho del filete: Con la siguiente fórmula calculamos el ancho de filete

$$e = 0.04 \times 0.02\text{m} \quad e = 0.008\text{m}$$

2.1.1.9.7. Paso del husillo: Con la siguiente fórmula determinamos el paso del husillo:

$$t = \pi \times 0.02n \times \tan(17.6) \quad t = 0.01$$

2.1.1.9.8. Longitudes de las zonas del husillo: Con las siguientes fórmulas determinamos la longitud en 3 zonas:

$$\text{Alimentación: } Z1 = \frac{0.4}{2} = 0.2m$$

$$\text{Compresiones: } Z2 = \frac{0.4}{4} = 0.1m$$

$$\text{Dosificación: } Z3 = \frac{0.4}{4} = 0.1m$$

2.1.1.9.9 Profundidad del canal: Con la siguiente fórmula podemos encontrar tal profundidad

$$H = 0.15 \times 0.02m \quad H = 0.003m$$

2.1.1.9.10. Paso de la rosca: Con la siguiente fórmula hallamos el paso de la rosca

$$W = \pi \times 0.02m \times \tan(17.6) \quad W = 0.01993m = 0.02m$$

2.1.1.9.11. Revoluciones del husillo: Realizamos el siguiente cálculo

$$n = (100 \frac{1}{s} \times 3mm \times 1s) / \pi \times 60min \quad n = 1.59 \frac{rev}{s}$$

Ahora necesitamos que las unidades queden en rpm para los cálculos del motor realizamos

$$\text{lo siguiente: } n = 1.59 \frac{rev}{s} \times 60s/1min \quad n = 55$$

2.1.1.9.12. Relación de compresión: Con la siguiente ecuación determinamos la relación de compresión β_1 la cual crucial para asegurar que el material se compacte adecuadamente durante el proceso de extrusión, mejorando así la calidad del filamento final.

$$\beta_1 = \frac{0.009m}{0.003m} = 3$$

2.1.1.9.13. Potencia requerida: Hallaremos la potencia necesaria para extruir el PET. Este cálculo es esencial para dimensionar el motor de la extrusora, asegurando que tenga suficiente potencia para procesar el material sin sobrecargarse.

$$P = \frac{96rpm \times \pi \times (60mm)}{66.7^2} = 14.64kw$$

2.1.1.9.14. Flujo de arrastre: Calculamos el tipo de flujo para asegurar que el material fluya a través del husillo durante la extrusión. Este parámetro ayuda a evitar problemas como atascos o una inconsistente del material.

$$\text{Flujo de arrastre} = \frac{\pi \times 0.02m \times 0.009n \times (0.02m - 0.0072m) \times \cos(17.6)^2}{2} = 0.0002077566. m^3$$

2.1.1.9.15. Flujo de presión: calculamos el flujo de presión, este es importante para determinar la capacidad de manejar la presión interna durante la extrusión, garantizando un flujo continuo del material.

$$\beta_2 = \frac{(0.009m)^3 \times 0.0528m \times \sin(17.6) \times \cos(17.6)}{12 \times 0.4m} = \beta_2 = 0.0000000003504 \text{ cm}^3 = \beta_2 = 0.0003504 \text{ cm}^3$$

2.1.2 Resultados del objetivo 2

2.1.2.1 Presupuesto de materiales. En la evaluación de los materiales, consideramos el presupuesto disponible y seleccionamos aquellos que se ajustaban mejor a nuestras restricciones económicas, priorizando la eficiencia. El costo se encuentra expresado en moneda colombiana en la siguiente tabla de cotización.

Tabla 8 *Presupuesto de materiales*

Equipos	Precio
Motor Extrusora	\$ 300.000
Cadenilla	\$ 10.000
Piñones	\$ 5.000
Driver l298n	\$ 14.000
Arduino uno	\$ 30.000
Fuente 24v	
Controlador de temperatura Rex-c100	\$ 80.000
Termocupla tipo k	\$ 20.000
Relé estado sólido 40 amperios	\$ 45.000
Resistencia de Nicromo	\$ 90.000
Bridas	\$ 25.000
Chumaceras	\$ 52.000
Broca 5/8	\$ 25.000
Motor 1hp	\$ 1.000.000
Poleas	\$ 20.000
Banda	\$ 10.000
Cuchillas fijas y móviles	\$ 504.000
Eje	\$ 190.000
Motorreductor	\$2.000.000
Total	\$ 1.310.000

2.1.2.2 Compra de materiales. En nuestra búsqueda de soluciones sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, hemos adoptado una práctica innovadora: el reciclaje de materiales, para darles un segundo uso en la implementación para nuestro prototipo. En lugar de descartar componentes que podrían considerarse obsoletos, hemos implementado un proceso de rescate y reutilización. Al rescatar estos elementos y darles una mejor utilización, estamos avanzando hacia prácticas más sostenibles, promoviendo la economía circular y destacando la importancia de repensar nuestro enfoque hacia los recursos disponibles.

Un ejemplo es el conjunto conformado por el motor, las poleas y la banda, provenientes de una lavadora en desuso. Optamos por reutilizar estos materiales, extraídos de la lavadora averiada, logrando una eficiencia destacada y generando un ahorro financiero significativo. Los demás elementos mencionados fueron adquiridos según se detalla en la tabla 9.

2.1.2.3 Ensamblaje y fabricación de los prototipos

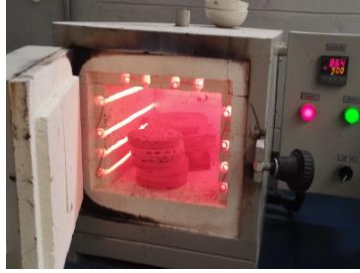
Construcción de la trituradora. Ya seleccionado el diseño, los materiales y los componentes para el prototipo se procede a la fabricación y construcción de la trituradora de acuerdo con los diseños planteados.

Figura 8. *Cortes plasma de cuchillas*



Se procedió a efectuar el proceso de corte por plasma en las cuchillas móviles, los separadores y las cuchillas fijas, utilizando acero HR de un espesor de calibre de 12 mm. El corte por plasma es un proceso de alta precisión y eficiencia, que implica la utilización de un chorro de plasma caliente para cortar con precisión materiales metálicos.

Figura 9 *Tratamiento térmico cuchillas*



Este paso consistió en la exposición de las cuchillas a un tratamiento térmico, en el cual se sometieron a una temperatura de 900°C durante un período continuo de 3 horas. Posteriormente, se procedió a sumergir las cuchillas en un contenedor aceite, este proceso de enfriamiento súbito se conoce en la tecnología de procesamiento de materiales como tratamiento de temple y se utiliza para endurecer los materiales que van a estar sometidos a desgaste. Este procedimiento de templado se emplea con el propósito de mejorar las propiedades mecánicas de los metales, específicamente en este caso, las cuchillas utilizadas en el proceso de trituración.

Ensamblaje cuchillas y eje

Figura 10 *Fabricación del eje en torno*



Durante esta etapa, se llevó a cabo la afilación de las cuchillas y la confección del eje, incorporando un proceso de fabricación. Posteriormente, se sometió a pruebas exhaustivas el eje para evaluar la ausencia de cualquier tipo de pivoteo que pudiera girar en el mismo eje sin presentar fallos. Asimismo, se implementó la creación de una rosca en el eje, estratégicamente diseñada para garantizar una sujeción robusta de las cuchillas. Este paso adicional se ejecutó con la finalidad de

prevenir cualquier posibilidad de desprendimiento o desplazamiento no deseado de las cuchillas, contribuyendo así a fortalecer la integridad del sistema y optimizar su rendimiento.

Ensamble de la caja de trituración

Figura 11 *Ajuste de caja de trituración*



Durante el proceso de ensamblaje de la caja de trituración, se llevó a cabo un proceso de afilado para las cuchillas fijas, optimizando así su capacidad de corte para la trituración eficiente de las botellas plásticas. Posteriormente, se procedió al ensamblaje integral de la caja de trituración, incorporando las cuchillas fijas y los separadores correspondientes. En el proceso de ensamblaje, se realizó el ajuste y ensamblaje de las cuchillas móviles, junto con el eje y sus chumaceras, adaptando el eje en el centro de la caja y las cuchillas fijas. Es esencial destacar que durante este proceso se tuvo especial cuidado para garantizar que el eje no interfiera con las cuchillas fijas, asegurando un espacio adecuado y, al mismo tiempo, promoviendo un agarre firme y seguro entre todas las cuchillas.

Fabricación de la Estructura, Tolva y Sistema de Almacenamiento del Material Triturado para el Prototipo de Trituradora de PET.

En la construcción de la tolva y el sistema de almacenamiento, se consideraron las dimensiones de la caja de trituración y la malla metálica, que cumple la función de una criba. La tolva se diseñó

replicando las proporciones de la caja y se soldó directamente a esta. En cuanto al sistema de almacenamiento, se cuidó su colocación para evitar interferencias con la malla, dejando un espacio entre ambos componentes. Este espacio garantiza que solo el material del tamaño de los huecos de la malla pueda pasar através.

Figura 12 Ensamblaje del prototipo trituradora.



Durante la fabricación de la estructura, se prestó especial atención a la posición del motor para asegurar una disposición óptima. Esto se logró mediante la alineación precisa de las poleas del motor y del eje, reduciendo la elongación de la banda. Esta cuidadosa planificación posibilita que el motor accione el eje eficientemente a través de las poleas y la banda, sin interferencias, contribuyendo así al rendimiento óptimo del sistema.

Construcción de extrusora

Tolva y cañón

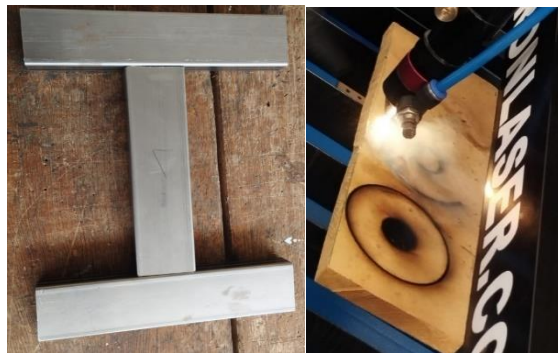
Figura 13.*Elaboración de la extrusora parte de la tolva y cañón*



Durante la ejecución de esta etapa del proceso, se llevó a cabo una operación de corte en el tubo designado para funcionar como cañón. Este corte fue realizado con el fin de establecer una conexión efectiva con la tolva diseñada específicamente para la recepción del material plástico PET previamente sometido al proceso de trituración. Esta operación de corte se convierte en un paso crítico, ya que garantiza una transición fluida entre el cañón y la tolva, asegurando un flujo constante y sin obstrucciones del material triturado hacia el siguiente proceso de la línea de producción.

Cañón extrusión, aislante térmico y base

Figura 14. *Fabricación de la parte de extrusión*



En esta sección, se creó un aislante de madera diseñado para resistir la transferencia de calor durante el aumento de temperaturas en el cañón. Además, se construyó el propio cañón capaz de soportar temperaturas superiores a los 200°C, y se adquirieron bridas que posibilitarán la separación entre la sección de calentamiento y la parte correspondiente a la tolva. Para culminar, se llevó a cabo la fabricación de la base.

Fabricación del sistema de cadena para el motor y broca

Figura 15. *Trasmisión de la extrusora*



En esta sección, desarrollamos una modificación que posibilita la conexión entre el eje del motor y el piñón pequeño, permitiendo que el eje del motor gire junto con el piñón. De manera similar, aplicamos el mismo principio a la broca, uniéndola al piñón grande y a una chumacera para mantener su estabilidad. Este sistema tiene la función de incrementar el torque de la broca al fusionar el piñón pequeño con el grande, generando una dinámica similar a la de una banda y otorgando así una mayor potencia al torque de la broca.

Adaptacion de control de temperatura y resistencia

Figura 16. *Ensamblaje final*



Se implemento un dispositivo de control de temperatura REX C-100, que, a través de la lectura de una termocupla, regula la temperatura de manera precisa. Utilizando este control de temperatura, conseguimos mantener constante la temperatura de una resistencia conectada al cañón de extrusión mediante un relé. Este relé posibilita que el control de temperatura alcance la temperatura requerida y la mantenga estable. Así, cuando el control alcanza la temperatura

deseada, se apaga y se enciende intermitentemente para mantener equilibrada la temperatura de la resistencia.

2.1.3 Resultados del objetivo 3

2.1.3.1 Pruebas y ajustes. En estas pruebas analizamos los resultados obtenidos en la construcción de los prototipos y ajustamos los equipos, realizando varias pruebas de cada prototipo.

Prueba 1. En esta prueba, se ajustó el controlador con el fin de alcanzar la temperatura ideal en el momento en que se active el relé, manteniendo así una temperatura constante y evitando fluctuaciones significativas. Sin embargo, tras realizar las pruebas correspondientes, se observó que el filamento resultante presentaba una textura ligeramente aguada y cristalina, además de secarse con rapidez y tender a quebrarse con facilidad. Estos resultados sugieren que la temperatura del proceso puede estar demasiado elevada.

Figura 17. *Ajustes de la extrusora y resistencia.*



Prueba 2. Se ajustó la temperatura y se llevó a cabo la prueba con dicha configuración, lo que permitió la extrusión del filamento. Sin embargo, durante la elaboración, se observó que la producción de filamento era limitada. Tras analizar la situación, se concluyó que era necesario aumentar la presión en la boquilla para garantizar una extrusión adecuada.

Figura 18. *Filamento*



Prueba 3. Se llevó a cabo la primera prueba de la trituradora, sin embargo, los resultados fueron desfavorables. El diámetro de las partículas de PET no alcanzó el tamaño óptimo para el proceso de extrusión. Se obtuvieron partículas demasiado gruesas que provocaron el atasco de la broca de la extrusora, dificultando su funcionamiento adecuado.

Figura 19. *Pruebas y ajustes de la trituradora.*



Prueba 4. Durante esta prueba, se procedió a ajustar las cuchillas, logrando así obtener el tamaño óptimo de las partículas de PET para la extrusora. Como resultado, se llegó a la conclusión de que el tamaño no debe superar los 7 mm para garantizar un proceso eficiente.

Figura 20 *Resultados finales de la trituradora*



2.1.3.2 Evaluar las funciones del prototipo. Se llevó a cabo un análisis minucioso de las capacidades de producción del filamento, seguido de pruebas exhaustivas de extrusión y evaluaciones del filamento resultante. Como resultado de esta evaluación, se identificaron ciertas deficiencias en la efectividad del filamento. Sin embargo, se logró mejorar el producto final al introducir partículas diminutas y ajustar la temperatura de extrusión, lo que condujo a la obtención de un filamento de mayor calidad.

Conclusiones

Una conclusión importante es que el enfoque de reciclar y poder reutilizar materiales y equipos, muestra un compromiso sólido con la sostenibilidad ambiental y los principios de la economía circular. Un ejemplo notable es la recuperación y uso mejorado de componentes de una lavadora en desuso, lo cual demuestra una gestión innovadora y eficiente de los recursos. Este enfoque no solo ayuda a reducir el desperdicio, sino que también fomenta la reutilización de materiales, alineándose con los objetivos de sostenibilidad establecidos.

Así mismo, se consiguió una alta precisión en la fabricación de los componentes mecánicos del prototipo, lo cual se reflejó en las pruebas de resistencia y calidad del filamento producido. Los datos obtenidos indicaron que el filamento cumple con las especificaciones necesarias para su uso en impresoras 3D, confirmando que se alcanzó un 80 % de los objetivos del proyecto.

Otra conclusión relevante es la importancia de la precisión para evitar interferencias y garantizar un rendimiento óptimo, como en el caso de la trituradora, donde se necesitó una precisión considerable. Esto fue especialmente crítico en el diseño del eje, donde también se requirió un alto nivel de precisión para asegurar el funcionamiento adecuado del equipo.

Finalmente, los análisis de consumo de energía demostraron que es posible optimizar el proceso de extrusión para reducir los costos energéticos, cumpliendo así con el objetivo de eficiencia operativa. Los resultados mostraron que, con los ajustes apropiados, se puede mejorar la eficiencia energética, lo que tendrá un impacto positivo tanto en los costos operativos como en la sostenibilidad del proceso.

Recomendaciones

Se recomienda continuar buscando oportunidades para optimizar los costos en la adquisición de materiales, manteniendo un enfoque en la sostenibilidad y el reciclaje. Es importante explorar más oportunidades para el reciclaje y la reutilización de materiales, considerando la posibilidad de integrar componentes adicionales provenientes de dispositivos en desuso. Evaluar constantemente la eficiencia y precisión del proceso de fabricación también es esencial. Se deben explorar tecnologías emergentes o mejoras en la maquinaria para optimizar la producción y reducir posibles desviaciones en la calidad.

Referencias

A.G. Glover, J.M. Pearce. (2014). Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing. 96.

Akinfiresoye Waleola Ayo, OJ Olukunle and DJ Adelabu. (2017). Development of a Waste Plastic Shredding Machine. *International Journal*.

Álvarez, D. O. (15 de Julio de 2021). Plástico. Quilmes, Argentina.

Clinica Jurídica del Medio ambiente. (2019). *Situación actual de los plasticos en Colombia y su impacto en el medio ambiene*. Informa campaña plasticos. Obtenido de http://greenpeace.co/pdf/2019/gp_informe_plasticos_colombia_02.pdf

Evaselia. (11 de octubre de 2017). TIPOS DE PLÁSTICO. *Soluciones integrales de Envases*. Obtenido de <https://www.uc3m.es/sostenibilidad/simbolos-reciclaje>

Hachi, J. G., & Rodriguez, J. D. (Marzo de 2010). *Estudio de factibilidad para recilar embases plasticos de polietileno, teraftalato (PET)*. Guayaquil, Ecuador : Universidad Politecnica Salesiana. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2450/20/UPS-GT000106.pdf>

Idrees, M., Jeelani, S., Rangari, V. (2018). Three-Dimensional-Printed Sustainable Biochar-Recycled PET Composites. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 11.

Kreiger, M. (2014). Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing. *Journal of Cleaner Production*, 96.

Rocha, D. E., Perez, C., & Villanueva, J. (16 de Julio de 2020). Material ecológico para construcción en vidrio, arena y poliplásticos (VAPoli). *Cien.Ing.Neogranadina*, 30(2). Obtenido de Origen y evolucion del plastico: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-81702020000200049&lng=pt&nrm=iso#B22

Tellez, A. (2012). La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos. Bogota, Colombia.

Ulrich, K. T. (2012). *Diseño y desarrollo de productos*.

Vela, Cristian Camilo; Rey, Edixon Javier; Jaimes, Angie Nataly. (2018). *Diseño y construcción de prototipo de trituración para PET*. Villavicencio, Colombia: Universidad Cooperativa de Colombia. Obtenido de

<https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/5eed1e71-c5ef-43c4-8e52-e4b81f0be8b5/content>

Villarroel, F. L. (2011). *Introducción a la fabricación de lanchas de polietileno construidas por rotomoldeo*. Valdivia, Chile : Universidad Austral de Chile . Obtenido de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2011/bmfciv722i/doc/bmfciv722i.pdf>

Xanthos, M., Dey, S.K., Mitra, S., Yilmazer, U., Feng, C. (2002). Prototypes for building applications based on thermoplastic composites containing mixed waste. *Polymer Composites*, 153-163.

Ziegler, K. (25 de Julio de 2020). Obtenido de <http://delhipages.live/ciencias/quimica/karl-ziegler>