

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS**



**CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN:**

**DESARROLLO SOSTENIBLE DE PROCESOS INDUSTRIALES**

**APROVECHAMIENTO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO  
RECHAZADO DE UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN EN LA ELABORACIÓN  
DE FIBRA SINTÉTICA PARA UNA EMPRESA DE LA INDUSTRIA TEXTIL  
DE EL SALVADOR.**

**PRESENTADO POR:**

**ICELA BEATRIZ MARTÍNEZ MELÉNDEZ  
ÍTALO IVÁN MARTÍNEZ VÁSQUEZ  
WILLIAN JEFERSON VEGA PLATERO**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERO(A) QUÍMICO**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO DE 2025**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR:**

M.SC. JUAN ROSA QUINTANILLA

**SECRETARIO GENERAL:**

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO:**

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

**SECRETARIO:**

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABÍAN ORELLANA

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS**

**DIRECTORA INTERINA:**

ING. EUGENIA SALVADORA GAMERO DE AYALA

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS**

CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN:

**DESARROLLO SOSTENIBLE DE PROCESOS INDUSTRIALES**

**APROVECHAMIENTO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO  
RECHAZADO DE UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN EN LA ELABORACIÓN  
DE FIBRA SINTÉTICA PARA UNA EMPRESA DE LA INDUSTRIA TEXTIL  
DE EL SALVADOR.**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO(A) QUÍMICO**

PRESENTADO POR:

**ICELA BEATRIZ MARTÍNEZ MELÉNDEZ**

**ÍTALO IVÁN MARTÍNEZ VÁSQUEZ**

**WILLIAN JEFERSON VEGA PLATERO**

DOCENTE ASESOR:

**ING. MANUEL ALEJANDRO PACHECO ACOSTA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO DE 2025**

TRABAJO DE GRADO APROBADO POR:

DOCENTE ASESOR:

**ING. MANUEL ALEJANDRO PACHECO ACOSTA**

## **Dedicatorias**

Agradezco profundamente a mis padres, cuya dedicación, apoyo incondicional y ejemplo han sido la base sobre la cual he construido este logro. Su confianza en mí y su constante motivación han sido fundamentales para superar los retos a lo largo de este camino. A mis hermanos, les reconozco por ser mi fuente de ánimo y compañía en los momentos más desafiantes. Su apoyo constante me ha dado la fortaleza necesaria para alcanzar mis metas. Asimismo, extendiendo mi gratitud a todos los docentes que, con su guía y conocimiento, contribuyeron significativamente a mi formación ya que cada enseñanza impartida y cada consejo recibido han sido clave para el desarrollo de este proyecto. Gracias a cada uno de ustedes por ser parte esencial de este importante logro académico.

***Icela Beatriz Martínez Meléndez***

Doy gracias a Dios por darme la oportunidad de vivir una experiencia que me hizo crecer como persona. A mis padres, quienes me apoyaron incondicionalmente y tuvieron la paciencia, empatía y sabiduría para guiarme durante toda mi formación. A mi abuela, quien me atendió y cuidó para que pudiera concentrarme en mis estudios. A mis hermanos, quienes han sido mis ejemplos a seguir y parte esencial de mi vida. También quiero dedicar este logro a mis abuelos y mi tía, quienes ya no están conmigo, pero siempre soñaron con verme finalizar esta etapa. Finalmente, agradezco a todas las personas que, de alguna u otra forma contribuyeron a mi formación académica y personal. Cada experiencia ha sido de gran valor para mí, espero hacer sentir orgullosos a todos los que estuvieron conmigo, comparto con ellos este logro, gracias.

***Ítalo Iván Martínez Vásquez***

Agradezco primeramente a Dios por haber culminado una etapa de mi vida tan bonita como la universidad. A mi mamá, por ser la persona que siempre estuvo conmigo de la mano, que me apoyó en todo momento sin límite alguno. A mi tío, que siempre creyó en mí y me ayudó con todo lo que estaba a su alcance. A mi familia en general, a mis amigos dentro y fuera de la universidad, que son parte fundamental en mi desarrollo. A mis maestros a lo largo de mi estudio y a mis compañeros de tesina, Icela e Ítalo, con quienes hemos trabajado juntos todo este año para el desarrollo de este proyecto. A todos ellos, les expreso mi más profundo agradecimiento por su apoyo incondicional y por haber sido una parte esencial de todo este trayecto.

***Willian Jeferson Vega Platero***

## **Agradecimientos**

A nuestra querida alma mater, la Universidad de El Salvador.

A la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos y en general a la facultad de Ingeniería y Arquitectura.

A todos los docentes y colaboradores que forman parte de esta institución. Un agradecimiento muy especial para el Ing. Manuel Pacheco, quien, con su paciencia, sabiduría y dedicación, ha sido un pilar fundamental en nuestra formación académica y personal. Su orientación constante ha dejado una huella profunda en nosotros, desde las materias electivas con los tratamientos de aguas hasta ser el guía para la realización de este trabajo de graduación.

Nuestro más sincero agradecimiento por su apoyo incondicional. Gracias a su compromiso y esfuerzo, hemos alcanzado este importante logro. Sin su valiosa guía, no habría sido posible llegar hasta aquí.

A nuestras familias, por su amor incondicional y apoyo durante todo este viaje académico. Gracias por su paciencia, comprensión y por siempre brindarnos la motivación para seguir adelante.

Nuestro más sincero agradecimiento a todos, porque gracias a su compromiso, esfuerzo y apoyo, hemos podido alcanzar este importante logro. Sin su guía y colaboración, este momento no habría sido posible.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	vi
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.1. CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN .....	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.3. OBJETIVOS .....	3
1.4. JUSTIFICACIÓN .....	4
1.5. BENEFICIOS ESPERADOS .....	5
1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES .....	6
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. GENERALIDADES DE LOS PLÁSTICOS .....	7
2.2. TEREFTALATO DE POLIETILENO .....	9
2.3. PET EN LA INDUSTRIA TEXTIL .....	13
2.4. PROBLEMAS DE DESECHO DE PET EN LA PRODUCCIÓN .....	16
2.5. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS ÓPTIMOS PARA LA PRODUCCIÓN DE FIBRA SINTÉTICA A PARTIR DE PET RECICLADO.....	21
2.6. APROVECHAMIENTO DEL PET RECHAZADO .....	29
2.7. MÉTODO DE PRODUCCIÓN DE FIBRA TEXTIL A PARTIR DE PET RECICLADO.....	31
2.8. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO .....	35
2.9. PRUEBAS Y PARÁMETROS DE CALIDAD DE LA FIBRA TEXTIL....	36
2.10. SOSTENIBILIDAD EN EL APROVECHAMIENTO DEL PET .....	44
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA .....	53
3.1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	53
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	61
4.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	61
4.2. RESULTADOS OBTENIDOS .....	76
CONCLUSIONES.....	84
RECOMENDACIONES.....	86
BIBLIOGRAFÍA.....	87

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Código de identificación de resinas .....	9
Tabla 2. Materiales y equipo para la realización del experimento .....	53
Tabla 3. Clasificación de muestras .....	55
Tabla 4. Parámetros de preparación para agua de lavado.....	55
Tabla 5. Parámetros para proceso de lavado.....	56
Tabla 6. Parámetros para proceso de filtración .....	56
Tabla 7. Parámetros para proceso de enjuague.....	57
Tabla 8. Parámetros de preparación de horno para secado de muestras .....	58
Tabla 9. Parámetros para proceso de secado.....	59
Tabla 10. Parámetros para proceso de fundición .....	60
Tabla 11. Datos para análisis de resultados .....	77
Tabla 12. Comparativa económica de fibras.....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de bloques del proceso de producción de fibra textil con PET reciclado .....	35
Figura 2. Colocación de muestras de PET en mesa de trabajo previo a la inspección visual.....	62
Figura 3. Plástico PET cortado y triturado para la experimentación .....	62
Figura 4. Separación de PET que contiene etiqueta o pegamento de la botella.....	63
Figura 5. Separación completa de plástico PET .....	63
Figura 6. Medición de peso de PET de la línea 1 – L .....	64
Figura 7. Medición de peso de PET de la línea 1 – S .....	64
Figura 8. Peso de Detergente a utilizar en el lavado.....	65
Figura 9. 250 ml de agua de chorro con 39 g de detergente en polvo para la solución .	65
Figura 10. Solución de detergente .....	65
Figura 11. Lavado y retiro de solidos que flotaban con un colador de malla fina.....	66
Figura 12. Filtración de PET con la malla fina.....	67
Figura 13. Solidos que se retiraron del lavado (plástico, etiquetas, PET con pegamento) .....	67
Figura 14. Colocación de PET en toalla de absorción que a su vez esta sobre una bandeja de metal.....	69
Figura 15. Distribución uniforme de PET sobre la bandeja.....	69
Figura 16. Secado con otra toalla de absorción .....	69
Figura 17. Colocación de PET Lavado y semiseco en la bandeja.....	70
Figura 18. Medición de grosor de capa de la distribución de PET en la bandeja de metal .....	71
Figura 19. Introducción de bandejas con PET en horno a 80°C para su secado .....	72
Figura 20. Toma de muestra para terminar de retirar humedad en desecador .....	72
Figura 21. Muestras de PET en desecador.....	72
Figura 22. Colocación de muestras en balanza de humedad .....	73
Figura 23. Resultados de la humedad en el PET .....	73
Figura 24. Fundición de plástico PET en olla .....	74
Figura 25. Bobinado de la fibra de PET.....	75

## **RESUMEN**

El proyecto presenta un enfoque en la reutilización del tereftalato de polietileno (PET) rechazado de una línea de producción para la elaboración de fibras sintéticas destinadas a la industria textil en El Salvador. La propuesta surgió como una respuesta a la problemática ambiental causada por los plásticos de un solo uso y se alinea con los principios de la economía circular, buscando reducir la contaminación, extender el ciclo de vida del PET y generar beneficios económicos y sociales.

El objetivo principal del proyecto era desarrollar un proceso eficiente y sostenible que permita transformar el PET en fibras textiles, cumpliendo con estándares de calidad establecidos por normas internacionales como ISO y ASTM. Para ello, se planteó una metodología que incluye el reciclaje mecánico del PET, considerando etapas fundamentales como la limpieza, el secado, la extrusión y el bobinado de las fibras.

El enfoque del trabajo no solo busca reducir los residuos plásticos mediante su aprovechamiento, sino que también promueve la sostenibilidad industrial al disminuir la dependencia de materiales vírgenes y fomentar la reutilización de recursos. En el aspecto ambiental, el reciclaje de PET contribuye a la disminución de la contaminación plástica en ecosistemas como ríos, océanos y suelos, minimizando su impacto a largo plazo. Económicamente, se ha previsto una reducción en los costos de producción al emplear materiales reciclados, lo que podría aumentar la competitividad de las empresas textiles que adopten este enfoque. Desde una perspectiva social, el proyecto fomenta la creación de empleos, el desarrollo de habilidades técnicas y el fortalecimiento de una cultura de sostenibilidad dentro de la industria textil, promoviendo prácticas responsables que integren la gestión eficiente de los recursos y la reducción de residuos. Los resultados preliminares obtenidos durante el desarrollo del proyecto muestran que las fibras textiles producidas a partir del PET reciclado cumplen con las propiedades mecánicas y químicas requeridas con una conversión de PET fundido a fibra textil del 14.28% con resistencia considerable y un alargamiento del 240% respecto a su longitud inicial. Esto las hace adecuadas para su uso en diversas aplicaciones, desde confección de prendas hasta productos industriales. Se identificaron varios factores ambientales e instrumentales que influyen directamente en la calidad del producto obtenido, entre ellos, la humedad ambiental durante el secado, la estabilidad de la temperatura en el proceso de fundición y en la extrusión de las fibras y la precisión de los instrumentos utilizados fueron elementos determinantes para el desarrollo del proyecto.

## **CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1.CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN**

El artículo “Impacto de la contaminación en el medio marino”, publicado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), enlista a los plásticos como una de las principales fuentes de contaminación marítima, generando daños a la vida marina y, consecuentemente, afectando a las economías locales y que dependen del sector. La propuesta surgió del interés grupal para llevar a cabo una investigación con el objetivo de ayudar a mermar la contaminación ambiental. Diversas instituciones, como la Organización de las Naciones Unidas, son conscientes de la problemática ambiental y las consecuencias que puede traer para la salud humana y la economía global, por lo que se han generado diversas estrategias con el fin de reducir la contaminación sin comprometer las necesidades humanas del presente ni del futuro, un ejemplo de esto es la “Agenda 2030: transformando el mundo del contexto global a la agenda regional” que se enfoca en el desarrollo sostenible y sus tres dimensiones: una ambiental, una social y una económica. Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), una de las estrategias para el alcance del desarrollo sostenible es la economía circular, un enfoque que busca reducir el desperdicio y hacer un uso más efectivo de los recursos, basándose en cerrar los ciclos de vida de los productos, los materiales y los recursos. Por este motivo, se considera que el eje de nuestra investigación debía ser la transformación de un desecho para convertirlo en materia prima y, posteriormente, en un producto, aumentando su vida útil, disminuyendo la contaminación provocada por su desecho y generando un ingreso económico.

Según un el artículo “Descripción General de la Industria de Plásticos en El Salvador”, publicado por “The Central American Group”, la industria del plástico es una de las más grandes en nuestro país, siendo la segunda clase más importante de producto manufacturado vendido en el extranjero, siendo superados por las prendas de vestir y ciertos accesorios de bisutería. Toda empresa productora genera desechos o mermas, productos considerados defectuosos que son rechazados y desechados, por lo que vimos una oportunidad para aplicar el enfoque circular.

## **1.2.DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

En 2019, las cadenas de valor agrícolas utilizaron 12,5 millones de toneladas de productos plásticos en la producción vegetal y animal y 37,3 millones de toneladas en el envasado de alimentos, de acuerdo con el informe “Assessment of agricultural plastics and their sustainability: A call for action”, publicado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en 2021.

Según el artículo “Plásticos de un solo uso: una hoja de ruta para la sostenibilidad” publicado por el Centro Internacional de Tecnología Ambiental (CITA) División de Economía del PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) los plásticos de un solo uso, también llamados a menudo como plásticos desechables, se suelen utilizar para envases plásticos e incluyen artículos destinados a ser utilizados una sola vez antes de ser descartados como las botellas plásticas. La representante residente PNUD El Salvador, en su artículo “Si es posible la economía circular en El Salvador” (junio 2023) comenta que los plásticos generan emisiones de gases de efecto invernadero en cada etapa de su ciclo de vida, por lo tanto, alimentan la crisis climática, dañan gravemente los ecosistemas y limitan la capacidad de los países para cumplir los objetivos ambientales globales, plasmados en las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés).

Según el diagnóstico nacional de residuos presentado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) en colaboración del ministro Fernando Lopez, se expone que el país genera 4,226.48 toneladas de residuos por día, con una Disposición en rellenos sanitarios equivalente al 81 %, es decir, 3,001.00 toneladas por día y de los cuales aproximadamente el 25% es plástico.

Hoy en día, con el uso masivo de los componentes plásticos, se encuentran desde un 9% a 11% en su forma de polietileno de baja densidad (LDPE) y polipropileno (PP) y hasta un 26% a 31% como Tereftalato de Polietileno (PET), polietileno de alta densidad (HDPE) y policloruro de vinilo (PVC). La mayor parte de consumo proviene de materiales de un solo uso (Diagnóstico Nacional de Residuos, MARN 2022).

### **1.3.OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo General**

- Desarrollar un proceso eficiente y sostenible a nivel de laboratorio para la producción de fibra sintética en la industria textil a partir de envases de plástico.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Determinar métodos de clasificación de envases tipo PET que cumplan con los estándares de calidad para procesamiento de materia prima al producto final.
- Caracterizar las distintas etapas involucradas en el proceso de obtención de fibra textil a partir de PET reciclado.
- Determinar los parámetros óptimos para una mayor conversión de plástico PET en fibra sintética con propiedades textiles deseables y que tengan buena calidad.
- Realizar pruebas de calidad al producto final que cumplan con los estándares adecuados según normas ISO o normas ASTM.

## **1.4.JUSTIFICACIÓN**

Según el director ejecutivo de ONU Medio Ambiente “El plástico no es el problema. El problema es lo que nosotros hacemos con él. Esto significa que el peso de la responsabilidad recae en nosotros, para que seamos más inteligentes en cuanto a nuestra forma de utilizar este material”.

La crisis de la contaminación por plásticos se deriva principalmente de la economía lineal actual, es decir, producir, usar y desechar. Para reducir la contaminación por plásticos, se deben adoptar acciones que concuerden con la jerarquía de gestión de residuos y con el enfoque de economía circular. Tal es el caso del PET, que es el tipo de plástico más usado para envases en industrias como la de alimentos y bebidas.

Las botellas de tereftalato de polietileno (PET) pueden ser recuperadas y recicladas, con el fin de obtener nuevos productos. Reciclar PET es reintegrar este polímero en un nuevo ciclo productivo como materia prima. Las telas fabricadas a partir de envases PET es una de las formas más convenientes de reciclar las botellas plásticas y prevenir la acumulación de las mismas.

Ante este contexto, se busca gestionar un valor agregado a los residuos plásticos generados por las industrias y de esta forma minimizar los niveles de contaminación. Esto se logra planteando un modelo de aprovechamiento de residuos, como lo es para el caso del aprovechamiento del PET rechazado para la elaboración de fibras textiles como parte de la economía circular, lo cual representa una alternativa viable para reducir la contaminación y crear un modelo económico más sostenible.

## **1.5.BENEFICIOS ESPERADOS**

Este proyecto se enfoca como una herramienta en la lucha contra la creciente crisis mundial de residuos plásticos. Al reciclar estos envases, no solo estamos abordando directamente la preocupante acumulación de plásticos en nuestros ecosistemas como quebradas, ríos y océanos, sino que también estamos trabajando para reducir los contaminantes que afectan a nuestro entorno.

Nuestro objetivo principal es desarrollar un método eficaz que permita transformar los envases procesados en una fibra textil de alta calidad. Esta fibra sintética resultante se convertiría en una valiosa materia prima para la fabricación de una amplia gama de productos textiles incluyendo manteles, camisas, pantalones, abrigos, carteras y mucho más. Queremos asegurarnos de que esta fibra sintética tenga muchos usos en diferentes sectores de la industria textil, expandiendo las posibilidades de reutilización de estos envases tipo PET y garantizando que no se quede en un nicho de mercado generando un valor agregado a lo que se considera un “desecho”.

Si ampliamos las opciones de utilización de esta fibra sintética se está fomentando una cultura de reutilización y sostenibilidad en la industria textil. Además, estamos contribuyendo a reducir la demanda de materias primas vírgenes y a disminuir la cantidad de plásticos desechados que terminan en vertederos o en algún ecosistema. Por último, este proyecto no solo busca resolver un problema inmediato de gestión de residuos, sino que también aspira a promover un cambio de paradigma hacia un modelo de producción más circular y responsable sobre los plásticos tipo PET.

## **1.6.ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **1.6.1. ALCANCES**

El estudio posee un enfoque cualitativo, pues pretende estudiar la factibilidad de fabricar un producto con materiales que provienen de la merma desechada por una empresa como base para nuestra materia prima entrando al proceso. El tipo de estudio es descriptivo, pues se pretende identificar y describir las etapas de un proceso de producción de fibra textil usando plástico como materia prima, identificar el tipo de plástico óptimo para materia prima y caracterizar las diferentes fibras utilizadas para la producción textil.

### **1.6.2. LIMITACIONES**

- La cantidad de materia prima, así como sus condiciones y tiempos de entrega serán estipulados por la empresa de la que proviene.
- Dificultad para realizar pruebas a nivel de planta piloto para el proceso de producción debido a la no disponibilidad de equipo adecuado.
- Poca disponibilidad de materia prima para la realización de pruebas piloto.

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1.GENERALIDADES DE LOS PLÁSTICOS**

Se conoce como plástico a los materiales sólidos que tienen la propiedad de ser maleables, normalmente se trata de un polímero de alto peso molecular, que actualmente tienen una gran variedad de usos. Un polímero es una molécula grande compuesta de un gran número de unidades repetitivas llamados monómeros unidos entre sí por enlaces covalentes, cuya característica esencial es la polifuncionalidad, es decir, la capacidad de formar enlaces químicos con al menos otras dos moléculas de monómero. Según Robert Young y Peter Lovell, en su libro “Introduction to polymers”: *Las fuentes primarias para la producción de polímeros sintéticos son el petróleo crudo, el gas natural y, en menor medida, el carbón. De la destilación del petróleo se obtiene la nafta de la que se derivan una serie de potenciales monómeros.*

Diversos autores coinciden en tres formas de clasificar a los polímeros plásticos, por el acomodamiento de las cadenas, por comportamiento térmico y por su elasticidad y dureza. Por el acomodamiento molecular en estado sólido, los polímeros se dividen en cristalinos y amorfos; cuando las resinas se encuentran en estado líquido o fundido, las cadenas moleculares se relajan totalmente pasean sin acomodamiento alguno, pero al comenzar el proceso de solidificación con el enfriamiento del material, dependiendo de la química del material, las cadenas poliméricas tratarán de acomodarse (cristalinas) o permanecer en desorden (amorfos). La diferencia entre un acomodamiento molecular y otro le confiere a la materia diversas propiedades físicas, que resultan útiles para diferentes propósitos.

La clasificación por comportamiento térmico puede ser la más útil para la industria de los plásticos debido a que proporciona una base lógica para entender sus características y cómo aprovecharlas de manera óptima en términos de fabricación, uso final y reciclaje, lo que facilita su uso en diferentes aplicaciones. El libro “Los polímeros plásticos” de Sara Reynoso divide a los polímeros según su comportamiento frente a la exposición al calor en termoplásticos y termofijos, siendo la principal diferencia que una resina termoplástica puede cambiar de estado líquido a sólido una cantidad ilimitada de veces al aplicar calor, y volver a solidificarse una vez que su temperatura disminuye, mientras que una resina termofija o termoestables no se funden, sino que pasan por un proceso de reticulación conocido como “curado” a partir de un pre-polímero líquido o sólido

viscosos, volviendo al plástico en un material rígido, insoluble y no fundible, inducido por la acción del calor o la radiación a menudo bajo presión, o pasando por una reacción química por acción del calor, un catalizador, luz ultravioleta u otro medio similar.

Al clasificar a los plásticos por su flexibilidad surgen dos grandes grupos, el de las resinas plásticas que son rígidos o semiflexibles, y el grupo de los cauchos, formado por elastómeros cuya principal característica es la elasticidad.

La versatilidad de los plásticos lo han convertido en uno de los materiales más usados a nivel global, Sin embargo, el éxito en el desarrollo tecnológico no ha llevado emparejada la previsión de reciclado de los productos, El artículo “Impacto de la contaminación en el medio marino”, publicado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), enlista a los plásticos como *una de las principales fuentes de contaminación marítima*, generando daños a la vida marina y, consecuentemente, afectando a las economías locales y que dependen del sector.

## 2.2. TEREFTALATO DE POLIETILENO

El polietilenotereftalato o tereftalato de polietileno, conocido como PET por sus siglas en inglés, es un polímero plástico con características especiales como ser un material termoplástico y con alto grado de cristalinidad que a temperaturas altas se vuelve flexible y permite su fácil manipulación y transformación. Por sus propiedades físicas es un material utilizado en la producción de láminas, botellas, envases para alimentos, textiles y también para la fabricación de materiales multicapa en aplicaciones que no son de envasado.

La Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) establece un sistema internacional de códigos para identificación de resinas que consiste en una figura conformada por triángulo de Mobius (símbolo universal del reciclaje) y un símbolo que identifica el material con el que está hecho el envase. Para identificar el tereftalato de polietileno (PET) se utiliza un triángulo formado por 3 flechas sucesivas que rodean el número “1” o las siglas “PET”.

*Tabla 1. Código de identificación de resinas*

MATERIAL	SIGLA	CÓDIGO
Tereftalato de polietileno	PET	1
Polietileno de alta densidad	HDPE	2
Polivinilo	V	3
Polietileno de baja densidad	LDPE	4
Polipropileno	PP	5
Poliestireno	PS	6
Otros	OTHER	7

Existen 3 tipos diferentes de tereftalato de polietileno que se explican a continuación.

- APET: El tereftalato de polietileno amorfo se encuentra en forma cristalina cuando está en forma de pellet y se vuelve amorfo en el proceso de extrusión. Se usa principalmente para alimentos que requieren visualización y por ello demanda de su alta transparencia y resistencia al impacto.
- RPET: PET reciclado.
- CPET: El polietileno tereftalato cristalizado es un material opaco, transparente y menos rígido o más flexible, el CPET mantiene su forma a altas temperaturas.

### 2.2.1. Características Y Propiedades

Gracias a las características y propiedades físicas que presenta como material, el PET es muy comercializado para sus distintos usos y que se opte por tener un desarrollo relevante en su reutilización para la producción de diversos productos que son consumidos por las personas, entre ellos la fibra textil (Wang, 2016). Entre las propiedades más útiles para los diversos usos de los materiales plásticos, según los diversos autores citados en la bibliografía de este documento, se pueden mencionar las siguientes:

- Biorientación: Permite lograr propiedades mecánicas con una optimización de espesores. Resistencia al desgaste, Facilidad al plegado, Buen coeficiente de deslizamiento
- Cristalización: Permite lograr resistencia térmica para utilizar bandejas termoformadas en hornos a elevadas temperaturas de cocción.
- Esterilización: El PET resiste esterilización química con óxido de etileno y radiación gamma.
- Factor barrera: Se denomina factor barrera a la resistencia que ofrece el material con el que está constituido un envase al paso de agentes exteriores al interior del mismo. Estos agentes pueden ser por ejemplo malos olores, gases ofensivos para el consumo humano, humedad, contaminación, etc. El PET se ha declarado excelente protector en el envasado de productos alimenticios, precisamente por su buen comportamiento barrera.
- Transparencia: La claridad y transparencia obtenida con este material, es su estado natural (sin colorantes) es muy alta, obteniéndose un elevado brillo. No obstante, puede ser coloreado con pigmentos de colores adecuados sin ningún inconveniente.
- Peso: El PET es más ligero en comparación con otros polímeros; un envase requiere de una consistencia aceptable para proteger el producto que contiene y dar sensación de seguridad al consumidor.
- Resistencia química: El PET es resistente a multitud de agentes químicos agresivos los cuales no son soportados por otros materiales.
- Degradación Térmica: La temperatura soportable por el PET sin deformación, ni degradación, aventaja a la de otros materiales, ya que, como se indica en el libro “Los Polímeros plásticos” de Sara Reynoso, este material se extrusiona a

temperaturas superiores a 250°C, siendo su punto de fusión de 260°C. Apto para ser transformado mediante procesos de inyección, inyección-soplado, extrusión y termo formado.

- Conformidad sanitaria: El PET supera a multitud de materiales en cuanto a calidad sanitaria por sus excelentes cualidades en la conservación del producto. El PET es un poliéster y como tal es un producto químicamente inherente y sin aditivos. Los envases fabricados correctamente son totalmente inofensivos en contacto con los productos de consumo humano.
- Reciclado y recuperación: El PET puede ser fácilmente reciclado, principalmente por el proceso mecánico y ser nuevamente útil.

### **2.2.2. Usos Comunes Del PET En La Industria**

Entre todos los polímeros comúnmente utilizados para el envasado de alimentos y bebidas, el tereftalato de polietileno (PET) es el más adecuado, ya que este plástico, en comparación con los demás, sobresale por su alta estabilidad fisicoquímica y buenas propiedades de barrera, sin olvidar sus grandes propiedades térmicas y mecánicas, como la resistencia a la corrosión, al desgaste y a las altas temperaturas, por lo cual se utiliza también para la producción de refuerzos plásticos (Wang, 2016).

**PET de grado textil:** La primera aplicación industrial del PET fue la textil, durante la Segunda Guerra Mundial, para remplazar a fibras naturales. Es utilizado para fabricar fibras sintéticas, principalmente poliéster (nombre común con el que se denomina al PET de grado textil) en sustitución de algunas como algodón o lino. Ya sea como filamento continuo o como fibra cortada, el PET encabeza a los polímeros textiles. Se emplea para la producción de fibras de confección (es muy utilizado en mezclas de diversos porcentajes con el algodón) y para rellenos de edredones o almohadas, además de manufacturarse con él tejidos industriales de sustentación para cauchos, lonas, bandas transportadoras y otros numerosos artículos.

Los diferentes usos que se le pueden dar al tereftalato de polietileno (PET) reciclado en una industria como es la de la moda, son una alternativa real que se está contemplando por corresponder a una economía circular sostenible. Es por ello que el PET reciclado juega un papel fundamental en la fabricación de ropa y accesorios por su repuesta positiva ante la contaminación y por su aporte al medio ambiente. Los plásticos se dividen en dos grupos, unos son los termoestables los cuales pueden llegar a adquirir una estructura más

blanda cuando se calientan, pero no pueden llegar a su estado líquido. Debido a esto no pueden volver a ser reprocesados. Por otro lado, tenemos a los termoplásticos, los cuales si pueden llegar a ablandarse y endurecerse nuevamente sin ningún problema.

**PET de grado botella:** Es utilizado para fabricar botellas, debido principalmente a que el PET ofrece características favorables en cuanto a resistencia contra agentes químicos, gran transparencia, ligereza, menores costos de fabricación y comodidad en su manejo, lo cual conlleva un beneficio añadido para el consumidor final. Aunque comúnmente se asocia con el embotellado de las bebidas gaseosas, el PET tiene infinidad de usos dentro del sector de fabricación de envases.

**PET de grado film:** El PET se utiliza también en gran cantidad para la fabricación de film: en la práctica, todas las películas fotográficas, de rayos X y de audio están hechas de PET.

**PET de grado ingeniería:** El PET también es utilizado para realizar una gran diversidad de productos plásticos, como: cuerdas, hilos, refuerzos de llantas, mangueras, mangos de brochas para pinturas, cepillos industriales, etc.

### **2.3.PET EN LA INDUSTRIA TEXTIL**

Las fibras sintéticas son aquellas fabricadas por el hombre, a través de procesos de síntesis química, obteniéndose largas cadenas moleculares denominadas polímeros. Dependiendo de la naturaleza química del monómero, o producto inicial, se obtiene una diversidad de polímeros útiles para su uso textil, que se pueden clasificar en Polímeros por policondensación y polímeros por poliadición.

Los polímeros sintéticos obtenidos por la unión de los monómeros con pérdida de agua en la formación del polímero se denominan policondensados. Constituyen las fibras con más difusión dentro de las sintéticas, y algunas de estas son: el poliéster, fibras de poliamida, el rayón y el spandex. Estas fibras se caracterizan por su resistencia, durabilidad, elasticidad y facilidad de teñido.

Los polímeros obtenidos de monómeros que poseen dobles enlaces en sus moléculas y cuya ruptura hacen posible la unión de dichas moléculas entre sí se denominan polímeros de adición. Las fibras más importantes comercialmente que se obtienen por este método son las fibras acrílicas, las fibras de Poliuretano y otras fibras con menos uso en la industria textil. Estas fibras se caracterizan por su resistencia al calor, a los agentes químicos y a la luz solar, así como por su bajo peso específico y su facilidad de teñido.

#### **2.3.1. El Poliéster**

Este es un tipo de fibra sintética que se obtiene a partir de la polimerización de compuestos derivados del petróleo. Según el artículo *“Prehistoric Polymers”* de Dorothy Hosler, Sandra Burkett y Michael Tarkanian, la primera fibra de poliéster que se comercializó fue la de poli (etilentereftalato) (PET), que se patentó en 1945 y se empezó a producir industrialmente en 1955. Desde entonces, se han desarrollado otras fibras de poliéster con diferentes propiedades y aplicaciones, como la poli (1,4-cicloexadimetilentereftalato) y la poli (butilentereftalato). Las fibras de poliéster se pueden presentar en forma de filamento continuo o de fibra cortada, y se pueden mezclar con otras fibras naturales o sintéticas para mejorar sus características. Las fibras de poliéster tienen una alta resistencia, durabilidad, elasticidad y resistencia al arrugado, al encogimiento y a la abrasión.

El proceso químico de la fabricación de fibra de poliéster se basa en la polimerización de dos compuestos derivados del petróleo: el ácido tereftálico y el etilenglicol. Estos compuestos se combinan mediante una reacción de condensación, que produce una

molécula grande llamada poliéster y libera agua como subproducto. El poliéster se funde y se extruye a través de unos orificios llamados hileras, formando filamentos continuos que se solidifican al enfriarse. Estos filamentos se estiran y se enrollan para obtener el hilo de poliéster, que se puede cortar o texturizar según el uso deseado.

#### Características de la fibra

- Resistencia: El poliéster es una fibra fuerte y resistente que puede soportar el desgaste y el uso diario. Tiene una alta resistencia a la tracción y a la abrasión, lo que lo hace ideal para aplicaciones de alta resistencia.
- Durabilidad: El poliéster es un material duradero que puede soportar el uso repetido y el lavado sin perder su forma o su color. Es resistente a la mayoría de los productos químicos y no se descompone fácilmente.
- Resistencia a la humedad: El poliéster es resistente a la humedad y no se ve afectado por la mayoría de los líquidos. Es resistente al moho y a la putrefacción.
- Resistencia a la luz: El poliéster es resistente a la luz solar y no se desvanece fácilmente. Es resistente a la decoloración y al blanqueamiento.
- Facilidad de cuidado: El poliéster es fácil de cuidar y no requiere mucho mantenimiento. Es resistente a las arrugas y se seca rápidamente, lo que lo hace ideal para la ropa de viaje.
- Resistencia al fuego: El poliéster es resistente al fuego y no se quema fácilmente. Es resistente a las llamas y no emite gases tóxicos cuando se quema.

#### **2.3.2. Ventajas Del Uso De PET Reciclado En La Industria Textil**

La fibra de poliéster es un tipo de material sintético que se utiliza para fabricar diversos productos textiles, como ropa, alfombras, cortinas, etc. El poliéster se puede obtener a partir de fuentes vírgenes o recicladas, lo que implica diferentes procesos de producción y de impacto ambiental. Sin embargo, tanto la fibra de poliéster virgen como la reciclada presentan algunas similitudes en sus propiedades y características, que las hacen adecuadas para diversas aplicaciones.

Algunas de las similitudes entre la fibra de poliéster virgen y reciclada son:

- Ambas son resistentes al desgaste, a las arrugas, a los hongos y a los insectos, lo que les confiere una larga durabilidad y facilidad de mantenimiento.

- Ambas son ligeras, suaves al tacto y tienen una buena caída, lo que las hace cómodas y versátiles para confeccionar prendas de vestir o decorar espacios.
- Ambas tienen una buena capacidad de retención del color y de resistencia a la luz solar, lo que les permite conservar su aspecto original durante mucho tiempo.
- Ambas tienen una baja absorción de humedad y una buena transpirabilidad, lo que las hace adecuadas para climas cálidos o húmedos.
- Ambas son fáciles de teñir, estampar o mezclar con otras fibras naturales o sintéticas, lo que les permite crear una gran variedad de diseños y efectos.

Las diferencias entre la fibra de poliéster virgen y reciclada son las siguientes:

- La fibra de poliéster virgen tiene una mayor calidad y resistencia que la reciclada, ya que no ha sufrido ningún proceso de degradación previo. La fibra de poliéster reciclada puede presentar impurezas, defectos o variaciones en el color o el grosor.
- La fibra de poliéster virgen tiene un mayor impacto ambiental que la reciclada, ya que consume más recursos naturales, energía y emite más gases de efecto invernadero. La fibra de poliéster reciclada contribuye a reducir la cantidad de residuos que se generan y a ahorrar recursos y energía.
- La fibra de poliéster virgen suele ser más cara que la reciclada, ya que su proceso de producción es más complejo y requiere más inversión. La fibra de poliéster reciclada tiene un menor coste, ya que aprovecha materiales que ya existen y que podrían acabar en vertederos o incineradoras.
- La fibra de poliéster virgen y la fibra de poliéster reciclada presentan diferencias significativas en cuanto a su composición, propiedades y efectos ambientales, se obtiene a partir de la polimerización de monómeros derivados del petróleo, mientras que la fibra de poliéster reciclada se obtiene a partir del reciclaje de botellas de plástico o de otros tejidos sintéticos.
- La fibra de poliéster virgen tiene una mayor resistencia, durabilidad y uniformidad que la fibra de poliéster reciclada, pero consume más energía, agua y recursos naturales en su producción. La fibra de poliéster reciclada, por su parte, tiene una menor huella ecológica, ya que reduce la cantidad de residuos plásticos y las emisiones de gases de efecto invernadero, sin embargo, también presenta algunos inconvenientes, como la pérdida de calidad, el riesgo de contaminación por sustancias tóxicas y la limitación de los colores disponibles.

## **2.4.PROBLEMAS DE DESECHO DE PET EN LA PRODUCCIÓN**

### **2.4.1. Causas Comunes Del Rechazo De PET**

**Contaminación por materiales ajenos:** una de las principales razones del rechazo de PET en los procesos de reciclaje es la contaminación por materiales ajenos. Al recolectarse el PET reciclado, puede mezclarse con otros tipos de plásticos como el PVC, PP o PE, además de etiquetas, metales y residuos orgánicos. Estos contaminantes interfieren con el proceso de reciclaje, ya que cada material tiene propiedades físicas y químicas diferentes.

Por ejemplo, el PVC tiene un punto de fusión más bajo que el PET y, durante el reciclaje, puede liberar cloro, lo que degrada el PET y genera gases tóxicos. Este tipo de contaminación compromete la calidad del producto final y puede provocar el rechazo del PET para aplicaciones de alto valor, como textiles o envases de alimentos.

**Diferencias en la composición química:** el PET reciclado puede provenir de diversas fuentes, como botellas de bebidas, envases de alimentos o textiles, lo que significa que su composición química puede variar considerablemente. Los diferentes aditivos empleados en estos productos, como estabilizadores UV o agentes barrera, afectan las propiedades del PET y, en muchos casos, generan incompatibilidades en el proceso de reciclaje.

Estas variaciones químicas pueden impedir la producción de un material homogéneo, lo que resulta en productos reciclados de baja calidad. Esto provoca que el PET reciclado sea rechazado cuando no cumple con los estándares técnicos de las industrias que requieren un material consistente.

**Coloración del PET:** el color del PET es otro factor crítico. Mientras que el PET transparente es el más demandado por su capacidad de ser teñido de cualquier color, muchas botellas y envases vienen en tonos verdes, azules o marrones. La mezcla de estos colores durante el reciclaje puede generar un producto final con apariencia turbia o apagada, que no es adecuado para aplicaciones que requieren un aspecto estético uniforme, como textiles o envases premium.

En la industria textil, por ejemplo, se requiere PET de color uniforme para producir fibras que puedan teñirse de manera consistente. Como resultado, los lotes de PET que incluyen mezclas de colores suelen ser rechazados para estos usos más exigentes.

**Degradación térmica:** durante el proceso de reciclaje, el PET está expuesto a altas temperaturas, lo que puede causar degradación térmica. Este fenómeno ocurre cuando las largas cadenas moleculares del PET se rompen debido al calor, lo que reduce su resistencia y durabilidad.

El PET que ha sufrido degradación térmica es más frágil y menos resistente a la tracción, lo que lo hace inadecuado para aplicaciones que requieren alta durabilidad, como envases o textiles. Además, si el PET se recicla varias veces, su calidad puede degradarse progresivamente, aumentando las posibilidades de que sea rechazado en procesos industriales.

**Presencia de aditivos o recubrimientos:** muchos productos de PET, como las botellas de bebidas, contienen aditivos o recubrimientos especiales para mejorar su funcionalidad. Algunos ejemplos incluyen barreras contra gases que preservan la carbonatación o recubrimientos que aumentan la resistencia a impactos.

Sin embargo, estos aditivos pueden interferir con el proceso de reciclaje, ya que no siempre se eliminan por completo, lo que afecta la pureza del PET reciclado. Esto es particularmente problemático para aplicaciones que requieren PET de alta pureza, como los envases alimentarios o productos textiles de alta calidad.

**Variación en el espesor:** el espesor del PET varía dependiendo del producto del que proviene. Las botellas de agua, por ejemplo, suelen ser más delgadas que las de refrescos o los envases de alimentos. Estas diferencias de espesor complican el reciclaje, ya que el material más grueso puede ser difícil de fundir de manera uniforme.

El PET de grosor inconsistente tiende a producir productos reciclados de calidad desigual, lo que lo hace inadecuado para aplicaciones que requieren precisión, como la fabricación de fibras textiles uniformes o envases moldeados. Esta inconsistencia en el espesor es una razón común para que el PET sea rechazado.

**Humedad excesiva:** el PET es un material higroscópico, lo que significa que absorbe humedad del ambiente. Si el PET reciclado contiene demasiada humedad durante el proceso, pueden aparecer burbujas o defectos estructurales en los productos finales. La humedad excesiva puede comprometer la integridad del PET reciclado, causando que el material no sea adecuado para aplicaciones de alta calidad. Para evitar estos problemas, el PET debe secarse adecuadamente antes de ser procesado, de lo contrario, es probable que sea rechazado en las primeras fases del reciclaje

#### **2.4.2. Impacto Del PET Rechazado En La Línea De Producción**

El rechazo de PET en la línea de producción no solo representa una pérdida significativa de material, sino que también tiene implicaciones directas sobre la eficiencia operativa, los costos y el impacto ambiental. Cada vez que una línea de producción rechaza un lote de PET, se generan efectos en cadena que afectan la rentabilidad de la operación y contribuyen a problemas de sostenibilidad.

**Pérdida económica por desperdicio de material:** el primer impacto directo del PET rechazado es la pérdida de material que podría haber sido utilizado en la producción de productos finales. En lugar de aprovecharse para fabricar envases, fibras textiles u otros productos, el material es desechado o enviado de nuevo para ser reprocesado. Esto representa un aumento en los costos de producción debido a la necesidad de reprocesar o reemplazar el material rechazado.

El reprocesamiento de PET implica costos adicionales tanto en energía como en tiempo, lo que afecta directamente la eficiencia y rentabilidad de la operación". Cada vez que un lote es rechazado, la empresa no solo pierde el valor del PET en sí, sino que incurre en gastos adicionales relacionados con la manipulación del material rechazado, el transporte, y el reprocesamiento.

**Interrupciones en la producción:** el rechazo de PET también puede causar interrupciones en la línea de producción. Cuando un lote es rechazado, el flujo continuo del proceso de fabricación se ve afectado, lo que puede llevar a paradas temporales o a ajustes en los equipos de producción. Esto no solo reduce la eficiencia operativa, sino que también puede generar demoras en la entrega de productos finales.

"Las interrupciones en la línea de producción debido al rechazo de materiales generan tiempos muertos y aumentan los costos de operación", ya que es necesario ajustar los equipos, inspeccionar el material y, en algunos casos, recalibrar las máquinas para garantizar la calidad del producto en los lotes futuros.

**Aumento de costos energéticos:** el reprocesamiento del PET rechazado también tiene un impacto significativo en el consumo energético. Cada vez que un lote de PET debe reprocesarse o reciclarse, se requiere energía adicional para triturar, limpiar y volver a fundir el material. Este consumo extra de energía no solo incrementa los costos de producción, sino que también contribuye a un mayor impacto ambiental, ya que implica el uso de recursos no renovables para repetir el proceso.

"El procesamiento adicional de PET rechazado genera un consumo energético elevado, lo que incrementa la huella de carbono de la operación". Las empresas que dependen de procesos eficientes de reciclaje pueden ver cómo sus costos energéticos se disparan debido a la necesidad de manejar repetidamente el material rechazado.

**Impacto ambiental del material desechado:** el PET rechazado que no puede reprocesarse o reutilizarse de manera eficiente suele terminar como desecho, lo que agrava el problema de la contaminación plástica. El material que no se recicla adecuadamente puede acabar en vertederos o, en el peor de los casos, filtrarse al medio ambiente, donde puede tardar cientos de años en descomponerse.

"El rechazo de PET contribuye a la creciente acumulación de residuos plásticos, que afectan tanto a los ecosistemas terrestres como marinos". El desecho de PET no solo agrava los problemas de gestión de residuos, sino que también representa una oportunidad perdida para reutilizar el material en un ciclo de economía circular.

**Impacto en la imagen y responsabilidad social:** el rechazo frecuente de PET también puede afectar negativamente la imagen de la empresa. En un mundo cada vez más consciente de la sostenibilidad, las compañías que no logran gestionar eficazmente sus materiales reciclables, o que generan una cantidad considerable de residuos, pueden ser percibidas como poco responsables desde el punto de vista ambiental.

"Las empresas que rechazan grandes cantidades de PET se enfrentan a críticas por su falta de sostenibilidad, lo que puede dañar su reputación y sus relaciones con los consumidores". Además, en muchas industrias, existe una presión creciente para adoptar prácticas de producción más sostenibles y reducir la cantidad de desechos generados.

**Desperdicio de recursos naturales:** el rechazo de PET en la línea de producción también se traduce en un desperdicio de los recursos naturales utilizados para producir el plástico en primer lugar. El PET es derivado del petróleo, un recurso no renovable. Cada vez que se rechaza PET, se pierden los recursos naturales y la energía que se emplearon para su creación.

"El rechazo del PET no solo implica pérdida económica, sino también un uso ineficiente de los recursos naturales, lo que agrava el impacto ambiental". Este desperdicio contraviene los principios de sostenibilidad que muchas empresas buscan adoptar para mitigar el agotamiento de los recursos y reducir su huella ecológica.

**Freno a la economía circular:** Finalmente, el rechazo de PET puede representar un obstáculo para la economía circular, un modelo de producción y consumo diseñado para prolongar el ciclo de vida de los materiales y reducir los residuos. En un entorno ideal, el PET rechazado sería reincorporado al ciclo de producción para crear nuevos productos. Sin embargo, cuando el PET no puede reutilizarse de manera eficiente, el ciclo se rompe, y los beneficios de la economía circular se pierden.

"El rechazo de PET impide el flujo continuo de materiales en una economía circular, lo que aumenta la dependencia de recursos vírgenes y disminuye los beneficios ambientales de los procesos de reciclaje". Esto implica que la empresa debe adquirir más materias primas, lo que contradice los principios de sostenibilidad y eficiencia de los recursos.

## **2.5.DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS ÓPTIMOS PARA LA PRODUCCIÓN DE FIBRA SINTÉTICA A PARTIR DE PET RECICLADO**

El PET es uno de los polímeros más utilizados en la fabricación de envases, principalmente en botellas de bebidas. El reciclaje de este ha ganado relevancia en las últimas décadas debido a la creciente preocupación por los problemas ambientales derivados del desecho de plásticos. Entre las múltiples aplicaciones del PET reciclado, la producción de fibras sintéticas para la industria textil ha sido una opción viable y sostenible. Sin embargo, para que el proceso de producción de fibra sea eficiente y se obtenga un producto de calidad, es fundamental determinar los parámetros óptimos en cada una de las etapas del proceso.

### **2.5.1. Proceso De Extrusión Del PET Reciclado**

La extrusión es el proceso clave en la transformación del PET reciclado en productos utilizables, como las fibras sintéticas. El éxito del proceso depende del control preciso de una serie de parámetros, ya que el PET reciclado tiene propiedades ligeramente diferentes del PET virgen debido al ciclo de vida anterior del material, el cual puede incluir múltiples procesos de calentamiento, enfriamiento y exposición a agentes externos. La extrusión transforma el PET reciclado en un material fundido que puede ser moldeado o hilado para formar fibras sintéticas. Este proceso involucra varios pasos críticos y requiere un control meticuloso de los parámetros para garantizar la calidad del producto final.

La extrusión es un método de procesamiento de polímeros donde el material se funde y se fuerza a través de una boquilla o matriz bajo condiciones controladas de temperatura, presión y velocidad. El objetivo principal es transformar el PET reciclado en un estado fundido homogéneo que pueda ser procesado para formar fibras continuas o películas.

El proceso de extrusión se lleva a cabo en una máquina llamada extrusora, que consta de varios componentes clave:

- **Tornillo de extrusión:** Es el elemento principal que transporta, comprime y funde el PET reciclado a medida que se mueve a lo largo de la extrusora. La rotación del tornillo genera el calor necesario para fundir el polímero, mientras que las zonas de compresión y transporte aseguran que el material avance hacia la boquilla.

- Zona de alimentación: Aquí se introduce el PET reciclado en forma de hojuelas, pellets o gránulos. En esta etapa, el material aún está sólido y comienza a ser transportado hacia las zonas de calentamiento.
- Zona de compresión: En esta parte del tornillo, el PET reciclado comienza a ser comprimido y fundido a medida que la temperatura y la presión aumentan. La compresión ayuda a eliminar las burbujas de aire y asegura que el material fluya de manera uniforme.
- Zona de dosificación: En esta última sección del tornillo, el PET reciclado ya está completamente fundido y se dosifica hacia la boquilla o matriz a una presión constante. La viscosidad del material fundido y la velocidad del tornillo deben estar alineadas para asegurar un flujo controlado y sin interrupciones.

### **2.5.2. Parámetros Clave En El Proceso De Extrusión**

Durante la extrusión del PET reciclado, varios parámetros influyen en la calidad del material fundido y, por ende, en la calidad de las fibras que se producen. Estos parámetros deben ser ajustados cuidadosamente en función de las características del PET reciclado, que puede variar en términos de cristalinidad, viscosidad y pureza.

**Temperatura de extrusión:** la temperatura de extrusión es uno de los parámetros más críticos para el éxito del proceso. Si la temperatura no es adecuada, puede llevar a varios problemas en el producto final.

- Temperatura adecuada: El PET se funde a temperaturas que oscilan entre los 150 °C y 180 °C. Mantener la temperatura en este rango es fundamental para evitar tanto la insuficiente fusión del material como su degradación térmica. Si la temperatura es demasiado baja, el PET no se fundirá completamente, lo que provocará un flujo irregular del material y defectos en las fibras. Por otro lado, una temperatura excesiva puede provocar una degradación térmica del PET, lo que reducirá la longitud de las cadenas poliméricas y, por lo tanto, la resistencia de las fibras.
- Distribución uniforme del calor: Asegurar una distribución uniforme del calor a lo largo del tornillo de la extrusora es clave para evitar puntos calientes o fríos que afecten la consistencia del PET fundido. Las zonas de calentamiento en la

extrusora deben ser controladas individualmente para lograr una fusión homogénea.

**Velocidad de extrusión:** la velocidad de extrusión se refiere a la rapidez con la que el material fundido se desplaza a través del sistema y es forzado a pasar por la boquilla o matriz. Este parámetro afecta tanto la productividad del proceso como la calidad del material extruido.

- Velocidad alta: Aumentar la velocidad de extrusión incrementa la tasa de producción, lo que puede ser ventajoso en términos de eficiencia. Sin embargo, una velocidad demasiado alta puede introducir tensiones en el material, lo que resulta en un enfriamiento desigual y, en última instancia, en una estructura molecular inadecuada. Esto puede provocar que las fibras resultantes sean frágiles o inestables.
- Velocidad baja: Una velocidad de extrusión demasiado baja, aunque evita tensiones, reduce la eficiencia del proceso y aumenta los costos de producción. Además, el tiempo de exposición prolongado a altas temperaturas puede aumentar el riesgo de degradación térmica del PET.

**Presión en boquilla:** la presión en la boquilla o matriz de la extrusora es otro factor crítico que influye en la calidad del flujo de material fundido y en las características finales del producto.

- Presión óptima: Una presión adecuada asegura que el PET fundido fluya de manera continua y sin interrupciones. Si la presión es demasiado baja, puede resultar en un flujo inconsistente, lo que afecta la uniformidad de las fibras o películas producidas. Si la presión es demasiado alta, puede generar sobrecarga en el sistema de extrusión, causando posibles daños al equipo o una mayor tasa de rotura de las fibras.
- Efecto sobre la viscosidad: La presión también está relacionada con la viscosidad del PET fundido. Una presión demasiado alta puede aumentar la viscosidad del material, dificultando su fluidez, mientras que una presión baja puede generar material mal extruido, lo que impacta directamente en las propiedades mecánicas de las fibras.

**Velocidad de enfriamiento:** una vez que el PET fundido ha sido extruido, es necesario enfriarlo rápidamente para que solidifique en la forma deseada. El enfriamiento debe ser controlado cuidadosamente para evitar tensiones internas en el material.

- **Enfriamiento rápido:** Un enfriamiento rápido es beneficioso para preservar la forma de las fibras y evitar deformaciones. Sin embargo, si el enfriamiento es demasiado rápido, puede generar tensiones residuales que afectarán la resistencia a la tracción y la estabilidad dimensional de las fibras.
- **Enfriamiento lento:** Si el enfriamiento es demasiado lento, las fibras pueden perder parte de su estructura molecular orientada, lo que disminuye la cristalinidad y, por ende, la resistencia y durabilidad de las fibras. Mantener un balance entre velocidad de enfriamiento y tiempo de exposición a bajas temperaturas es fundamental para lograr un producto final de alta calidad.

**Reología del PET reciclado:** la reología se refiere a la manera en que el PET fundido fluye bajo las condiciones de temperatura y presión aplicadas. Es esencial entender el comportamiento reológico del PET reciclado para optimizar el proceso de extrusión.

- **Viscosidad:** La viscosidad del PET fundido depende de su grado de polimerización y de la presencia de contaminantes o aditivos en el material reciclado. A mayor viscosidad, el material es más resistente a fluir, lo que requiere un mayor control sobre la presión y la temperatura en la extrusora. Si la viscosidad es demasiado baja, puede resultar en fibras frágiles y con poca resistencia a la tracción.
- **Comportamiento no newtoniano:** El PET, como muchos polímeros, presenta un comportamiento no newtoniano, lo que significa que su viscosidad cambia en función de la velocidad de deformación. Es necesario ajustar la velocidad del tornillo de extrusión y otros parámetros de procesamiento para asegurar que el material fluya de manera óptima a lo largo del proceso.

**Mejoras en el proceso de extrusión:** con el avance de la tecnología, se han introducido varias mejoras en el proceso de extrusión para aumentar la eficiencia y la calidad del PET reciclado procesado, como:

- **Sistemas de filtración avanzada:** Durante la extrusión del PET reciclado, la presencia de contaminantes puede obstruir las boquillas de la extrusora y afectar

la calidad del material. Los sistemas de filtración avanzada permiten eliminar partículas no deseadas antes de que el material sea extruido. Los filtros de malla fina y los sistemas de filtración continua garantizan un flujo limpio y reducen la frecuencia de mantenimiento de los equipos.

- **Extrusión con desgasificación:** El PET reciclado puede contener residuos de humedad o gases atrapados. Estos gases pueden causar burbujas o vacíos en el material extruido, lo que afecta la calidad del producto final. La extrusión con desgasificación elimina los gases y vapores del material fundido mediante el uso de cámaras de vacío en la extrusora. Este método asegura un material fundido más homogéneo y de mejor calidad.
- **Uso de aditivos:** En algunos casos, se añaden aditivos al PET reciclado durante la extrusión para mejorar sus propiedades. Los agentes estabilizantes térmicos ayudan a prevenir la degradación del material, mientras que los agentes mejoradores de viscosidad aumentan la longitud de las cadenas poliméricas, mejorando las propiedades mecánicas.
- **Condiciones de procesamiento del PET reciclado:** El procesamiento del PET reciclado es una operación compleja que requiere un control meticuloso de las condiciones físicas y químicas para mantener la calidad del material y asegurar su viabilidad para su reutilización en aplicaciones avanzadas, como la fabricación de fibras sintéticas. Debido a que el PET reciclado ha pasado previamente por múltiples ciclos de uso, puede experimentar cambios en sus propiedades que afectan su comportamiento durante el procesamiento. Por ello, es esencial entender y controlar los diversos factores que intervienen en las etapas clave del proceso, desde la recolección y preparación del material hasta su procesamiento térmico y mecánico.

### **2.5.3. Condiciones Del Procesamiento Del PET Reciclado**

El procesamiento del PET reciclado requiere de un control preciso de varias condiciones para garantizar la calidad del material final. A diferencia del PET virgen, el reciclado puede presentar impurezas, variaciones en la viscosidad y menor estabilidad térmica, lo que exige un monitoreo más estricto durante el proceso de extrusión y otras etapas de transformación. A continuación, se describen las principales condiciones que influyen en el procesamiento del PET reciclado.

**Pureza del material:** uno de los desafíos más importantes al procesar PET reciclado es la presencia de contaminantes. Estos pueden incluir restos de etiquetas, residuos de otros plásticos o materiales, y residuos orgánicos.

- **Clasificación y limpieza:** Antes de ser procesado, el PET reciclado debe ser sometido a un proceso riguroso de clasificación y limpieza para eliminar los contaminantes. Los sistemas de separación avanzada por sensores ópticos y la limpieza mediante lavado con detergentes específicos son esenciales para asegurar un material base lo más puro posible.
- **Impacto de las impurezas:** Las impurezas pueden degradar el material y afectar su procesabilidad, provocando irregularidades en el producto final, como burbujas, manchas o baja resistencia mecánica.

**Humedad:** el PET reciclado es altamente higroscópico, lo que significa que absorbe humedad del ambiente. La presencia de humedad en el material puede generar problemas durante el procesamiento, como la formación de burbujas y una reducción en las propiedades mecánicas del producto final.

- **Secado previo:** Es esencial que el PET reciclado sea secado adecuadamente antes de ser extruido o inyectado. Los secadores deshumidificadores de lecho seco o secadores al vacío son comúnmente utilizados para reducir el contenido de humedad a niveles aceptables (generalmente por debajo del 0.005% de humedad).
- **Efectos de la humedad:** Si el PET no se seca correctamente, el agua se descompone a altas temperaturas durante la extrusión, provocando hidrólisis del polímero. Esto resulta en una disminución de la viscosidad intrínseca del material, lo que compromete la calidad del PET reciclado y las propiedades del producto final.

**Temperatura de procesamiento:** la temperatura es un factor crítico en el procesamiento del PET reciclado, ya que afecta tanto la viscosidad del material fundido como su estabilidad térmica.

- **Temperatura de fusión adecuada:** El PET reciclado requiere temperaturas de procesamiento que oscilan entre 250°C y 285°C. Un control inadecuado de la temperatura puede llevar a la degradación del material o a la formación de

productos de baja calidad. Si la temperatura es demasiado alta, el material puede sufrir descomposición térmica, lo que genera subproductos indeseados que afectan su estructura.

- Degradación térmica: Durante el reciclaje, el PET ya ha pasado por ciclos de procesamiento térmico previos, lo que lo hace más susceptible a la degradación térmica en etapas posteriores. Para minimizar este efecto, se debe asegurar que la temperatura sea lo más baja posible, pero lo suficientemente alta para fundir el material.

**Viscosidad intrínseca:** la viscosidad intrínseca (VI) es un parámetro clave que mide la longitud de las cadenas moleculares del polímero y, por tanto, su resistencia y capacidad de ser procesado. El PET reciclado tiende a tener una menor viscosidad intrínseca en comparación con el PET virgen debido a la degradación durante el uso y el reciclaje.

- Control de la viscosidad: Para mantener las propiedades mecánicas deseables, se pueden emplear aditivos que aumentan la viscosidad del PET reciclado o que restauran parcialmente las cadenas moleculares del polímero. El control de la viscosidad también se puede realizar ajustando las condiciones de procesamiento, como la velocidad del tornillo y la temperatura.
- Viscosidad y calidad del producto final: Un PET reciclado con una viscosidad intrínseca demasiado baja resultará en productos débiles y frágiles, mientras que un control adecuado de este parámetro permite obtener fibras sintéticas fuertes y duraderas.

**Cristalinidad:** el grado de cristalinidad del PET reciclado afecta sus propiedades mecánicas y térmicas. El PET puede existir en formas amorfas o semicristalinas, y el reciclado tiende a reducir el grado de cristalinidad debido a la alteración de las cadenas moleculares.

- Recristalización controlada: Durante el procesamiento, es posible controlar el grado de cristalinidad mediante la temperatura de enfriamiento y la velocidad de estirado del material fundido. Un mayor grado de cristalinidad generalmente mejora la rigidez y la resistencia térmica del PET reciclado, pero también lo hace más frágil.

- **Enfriamiento controlado:** La velocidad de enfriamiento es un factor crítico. Si el material se enfría demasiado rápido, se formará una estructura amorfa, lo que puede disminuir la resistencia mecánica. Si el enfriamiento es demasiado lento, se formarán cristales grandes, que también comprometerán la calidad del producto.

**Desgasificación durante el procesamiento:** durante el procesamiento del PET reciclado, es común que se liberen gases atrapados en el material, ya sea por la humedad residual, la descomposición de aditivos o impurezas. La presencia de estos gases puede causar problemas significativos en el proceso de extrusión.

- **Efectos de los gases atrapados:** la presencia de gases durante la extrusión puede generar una serie de defectos en el material procesado, tales como burbujas, vacíos internos o problemas de cohesión estructural. La presencia de gases también puede interferir con el flujo del material fundido, generando irregularidades como:  
**Formación de burbujas:** Los gases atrapados en el PET fundido se expanden durante el calentamiento, lo que provoca la formación de burbujas visibles y huecos en el material, afectando la calidad final.  
**Defectos en el producto final:** La presencia de burbujas y vacíos en el PET reciclado afecta directamente la resistencia mecánica del producto final, lo que compromete su uso en aplicaciones exigentes, como la fabricación de fibras textiles.
- **Sistemas de desgasificación en la extrusora:** las extrusoras modernas están equipadas con sistemas de desgasificación que eliminan los gases y vapores del PET fundido mediante la aplicación de vacío. Este proceso asegura un flujo homogéneo y reduce la incidencia de defectos en el producto final.

## 2.6. APROVECHAMIENTO DEL PET RECHAZADO

Es un proceso que busca manipular los residuos a través de una transformación amigable con el medio ambiente, para ser utilizados en la fabricación de nuevos productos o de materiales que puedan llegar a ser aprovechados en algún proceso de producción y de esta forma reutilizar material potencialmente rentable y ayudar a la reducción de desechos. El reciclaje va de la mano con preservar y cuidar el medioambiente, no solo en el ahora, sino también para el bienestar de generaciones futuras. El reciclaje conlleva una numerosa cantidad de beneficios como por ejemplo poder evitar la explotación de recursos naturales, prever por la salud de animales, reducir la contaminación en mares, valles y ríos, no utilizar nuevas materias primas para fabricación y permitir el ahorro de energía. Existen tres maneras diferentes de aprovechar los envases de PET una vez que terminó su vida útil: *someterlos a un reciclado mecánico, a un reciclado químico, o a un reciclado energético* empleándolos como fuente de energía, sin embargo, este último no es una alternativa amigable con el medio ambiente, pues su enfoque es el mismo que el uso de petróleo como combustible para la generación de calor y conversión en energía eléctrica.

### 2.6.1. Métodos De Reciclaje De PET

**Reciclaje mecánico:** Consiste en realizar una separación de la materia prima para alimentar un proceso físico que consiste en fraccionar el material, aplicarle calor y presión y finalmente darle una nueva forma. En este proceso es indispensable realizar una adecuada selección para evitar la mezcla de diferentes materiales y garantizar la ausencia de partículas nocivas que afecten las propiedades físicas del producto. Este tipo de proceso no puede ser aplicado para todos los plásticos, únicamente puede aplicarse en los termoplásticos que se funden al ser llevados a altas temperaturas hasta superar el punto de fusión. En el proceso del reciclaje mecánico el PET sufre una disminución importante en sus propiedades mecánicas, reológicas y térmicas, esto se da por el aumento de pasos en el proceso. De manera general, se pueden identificar tres etapas fundamentales:

- Cuando el material llega a la central de reciclado pasa a una zona de lavado y secado para evitar que se mezclen impurezas.
- Una vez limpio se le somete a una trituración mediante máquinas de molienda, de forma que los trozos de material salen muy pequeños, en forma de bolitas o incluso a veces en forma de polvo.

Este material triturado alimenta una máquina de extrusión que proporciona calor y presión para que la masa de plástico se funda y pueda utilizarse para extrusionar o moldear piezas nuevas.

**Reciclaje químico:** es un proceso con el cual se descomponen los polímeros para obtener monómeros a través de Despolimerización Térmica (aportes de calor), Disolución, Solvolisis (aplicación de disolventes) o reactivos químicos. En la mayoría de los casos este reciclaje es considerado como un complemento del reciclaje mecánico, ya que tiene la capacidad de resolver sus restricciones como la necesidad de disponer grandes cantidades de residuos plásticos limpios, separados y homogéneos, para así poder garantizar un producto final de alta calidad. Dentro del reciclado químico, los principales procesos son:

- **Pirólisis:** Es el craqueo o quiebre de las moléculas por calentamiento en el vacío. Este proceso genera hidrocarburos líquidos o sólidos que pueden ser luego procesados en refinerías. En el caso del PET, su pirólisis genera carbón activado, es decir, un carbón poroso que atrapa compuestos, principalmente orgánicos
- **Hidrogenación:** En este caso los plásticos son tratados con hidrógeno y calor. Las cadenas poliméricas son rotas y convertidas en un petróleo sintético que puede ser utilizado en refinerías y plantas químicas.
- **Chemolysis:** Este proceso se aplica a poliésteres, poliuretanos, poliacetales y poliamidas. Requiere altas cantidades separadas por tipo de resinas. Consiste en la aplicación de procesos solvolíticos como hidrólisis, glicólisis o alcoholólisis para reciclarlos y transformarlos nuevamente en sus monómeros básicos para la repolimerización en nuevos plásticos.
- **Metanólisis:** Es un avanzado proceso de reciclado que consiste en la aplicación de metanol en el PET. Este poliéster (el PET), es descompuesto en sus moléculas básicas, incluido el dimetiltereftalato y el etilenglicol, los cuales pueden ser luego repolimerizados para producir resina virgen. Varios productores de polietileno tereftalato están intentando de desarrollar este proceso para utilizarlo en las botellas de bebidas carbonatadas.

## **2.7.MÉTODO DE PRODUCCIÓN DE FIBRA TEXTIL A PARTIR DE PET RECICLADO**

### **2.7.1. Preparación Del PET Reciclado**

**Lavado previo a trituración:** el scrap (residuos) de PET, libre ya de contaminantes, es lavado con agua a presión que contiene proporciones convenientes de detergente industrial para un proceso más efectivo. El material es enjuagado con agua pura y luego depositado en recipientes que tienen como base una malla metálica antioxidante de no más de 1/8 de pulgada de diámetro, que permite que fluya el agua con los residuos aún presentes. Con ayuda de los recipientes, el residuo es luego transportado a la secadora.

**Secado previo a trituración:** los fragmentos de PET, ya inspeccionados y limpios, antes de entrar al proceso de fundido para el hilado, deben ser secados bajo un constante control de temperatura. El secado puede ser al vacío (vacuum dryer) o, en su defecto, se emplea un sistema sencillo de flujo de aire caliente, gracias a resistencias eléctricas, suministrado por un ventilador. Posteriormente, el residuo ya libre de cualquier vestigio de humedad puede continuar con el proceso siguiente.

**Trituración:** una vez clasificadas en seco las botellas recicladas, son ingresadas por la boquilla de una trituradora con el fin de reducir de tamaño las botellas recicladas, caen en la garganta del molino, el cual mediante un juego de cuchillas giratorias y fijas produce las escamas. El tamaño final puede variar de una instalación a otra; sin embargo, habitualmente se debe obtener una escama con un tamaño menor de 12 mm y libre de polvo, para continuar con el proceso más adecuado para la producción de la fibra. Luego pasan a través de una criba metálica y caen dentro de la primera batea de separación por flotación.

Al hacer el proceso de trituración a las botellas de PET reciclado, nos proporciona un material más homogéneo, tanto en tamaño como de forma, sin importar su tamaño o forma inicial.

**Lavado posterior a trituración:** una vez molidas las botellas, se vierten las escamas en una tina llena de agua con detergente. En el fondo de esta tina hay un tornillo sin fin el cual gira lentamente produciendo una circulación por bombeo y desborde. Eventualmente quedan residuos de plásticos distintos al PET como trozos de tapas y etiquetas, los cuales tienen una densidad inferior a la del agua y esto hace que floten. Por el contrario, las

escamas del PET tienen una densidad mayor a la del agua y por lo tanto se van al fondo de la tina donde son transportados por el tornillo sin fin hacia una canastilla.

El PET es transportado mediante tornillos sin fin a tanques de lavado con una solución acuosa de lavado caliente y agitación para eliminación de suciedad adherida a las escamas de PET. La solución de lavado se compone de agua, soda cáustica y tensoactivos. Los tensoactivos son sustancias químicas que consiguen que dos líquidos inmiscibles (que no se mezclan) se unan de forma homogénea.

La soda cáustica permite la eliminación de los adhesivos que pueden contener las botellas por el colocado de etiquetas. Los trozos de etiquetas, tapitas y guarnición flotan en el agua y son arrastrados por paletas agitadoras, hasta desbordar y puede ser recuperado, lavado, secado, extruido y comercializado. Luego del lavado en caliente, las escamas de PET pasan por una serie de bateas de enjuague con agua.

**Secado posterior a trituración:** las escamas de PET posteriormente del lavado y antes de entrar al proceso de fundido e hilado, deben ser secados. Esta fase puede ser a vacío, empleando un secador a gas o un secador de deshumidificación el cual alcanza temperaturas entre 150°C y 180°C. Finalmente se procede con su almacenamiento y posterior extrusión. En esta etapa es primordial la temperatura ya que tiene una influencia bastante importante en la velocidad de fusión de las moléculas de agua que están sobre el polímero. Entre más alta sea la temperatura, más rápido y completo será el secado del PET. Sin embargo, hay que tener especial cuidado con temperaturas muy altas ya que puede llegar a la degradación u oxidación del material, mientras que si las temperaturas son muy bajas el PET perderá su humedad muy lentamente.

Otra opción para realizar el proceso de secado es la eliminación de agua por centrifugación, que requiere menos cuidado ya que no utiliza calor para su funcionamiento. Mediante un tornillo sin fin las escamas de PET son transportadas a la parte inferior de una centrífuga. Una vez que el material entró a la centrífuga asciende y es proyectado contra una camisa perforada que permite escapar el agua.

A la espera de ser envasadas, las escamas de PET son alojadas en un silo. Los mismos cuentan, por lo general, con dispositivos de dosificación (válvulas rotativas o tornillos sin fin) que permiten detener el flujo de material que permiten el cambio de los bolsos cuando están colmados, además de evitar la obturación del canal de salida con los mismos flakes (hojuelas).

### **2.7.2. Extrusión De Residuos De PET Para Formar Fibras**

Luego de tener la escama limpia y seca se somete a un proceso de extrusión, el cual consiste en hacer pasar bajo presión un material termoplástico a través de un orificio, es decir, se funde y moldea el material para obtener la forma deseada del PET para su aplicación final. La extrusión presenta alta productividad y es el proceso más importante para poder obtener formas plásticas en volumen de producción. Su operación es sencilla, ya que una vez se establecen las condiciones, la operación puede seguir sin ningún tipo de problema.

Consiste en forzar o bombear la solución de hilatura a través de los pequeños orificios de una hilera o tobera. Una hilera es una boquilla pequeña, semejante a un dedal. Este sistema es conocido comúnmente como tamiz de hilado que incluye además un filtro de malla, una placa metálica de distribución y partículas diminutas de metal para un filtrado extra. El tamiz debe ser recalentado para que el poliéster no se endurezca mientras fluye en estado líquido a través de este. Una vez recalentados los tamices, son colocados sobre orificios que se encuentran dispuestos, de manera tal de que por medio de ellos sea extruida la pasta. El residuo de PET se constituye en solución fundiéndolo (el punto de fusión del PET está alrededor de los 250 o 260 °C). Esta solución se conoce como solución de hilatura o pasta hilable, que tiene una consistencia espesa. La solución se filtra antes de ser extruida. Una vez fundida y obtenida la pasta, es extruida a través de los agujeros diminutos del tamiz, los cuales le dan forma de filamento al poliéster.

Las fibras obtenidas por la extrusión se enfrían y endurecen al hacer contacto con el aire. Los filamentos que se parten cuando el equipamiento arranca o se para se guardan en un contenedor para ser reciclados nuevamente.

### **2.7.3. Hilado Y Texturizado De Fibras De PET Reciclado**

El bobinado tiene como objetivo de enrollar los filamentos que se han formado en el extrusor, sobre un molde macho que puede llegar a ser cilíndrico o mandril. Las fibras resultantes de la extrusión pasan alrededor de unos rodillos que lo conducen a un compartimiento, donde el aire lo zarandeo para así poder enredar los filamentos y que puedan quedar unidos. El bobinado de la fibra textil está bien automatizado, en donde las tensiones de las fibras pueden ser controladas para así evitar la ruptura de la fibra.

**Estirado:** previo baño en una emulsión de agua y aceite, el hilo debe ser estirado. Las fibras artificiales, al ser extruidas, presentan un estado molecular aleatorio, sin orientar.

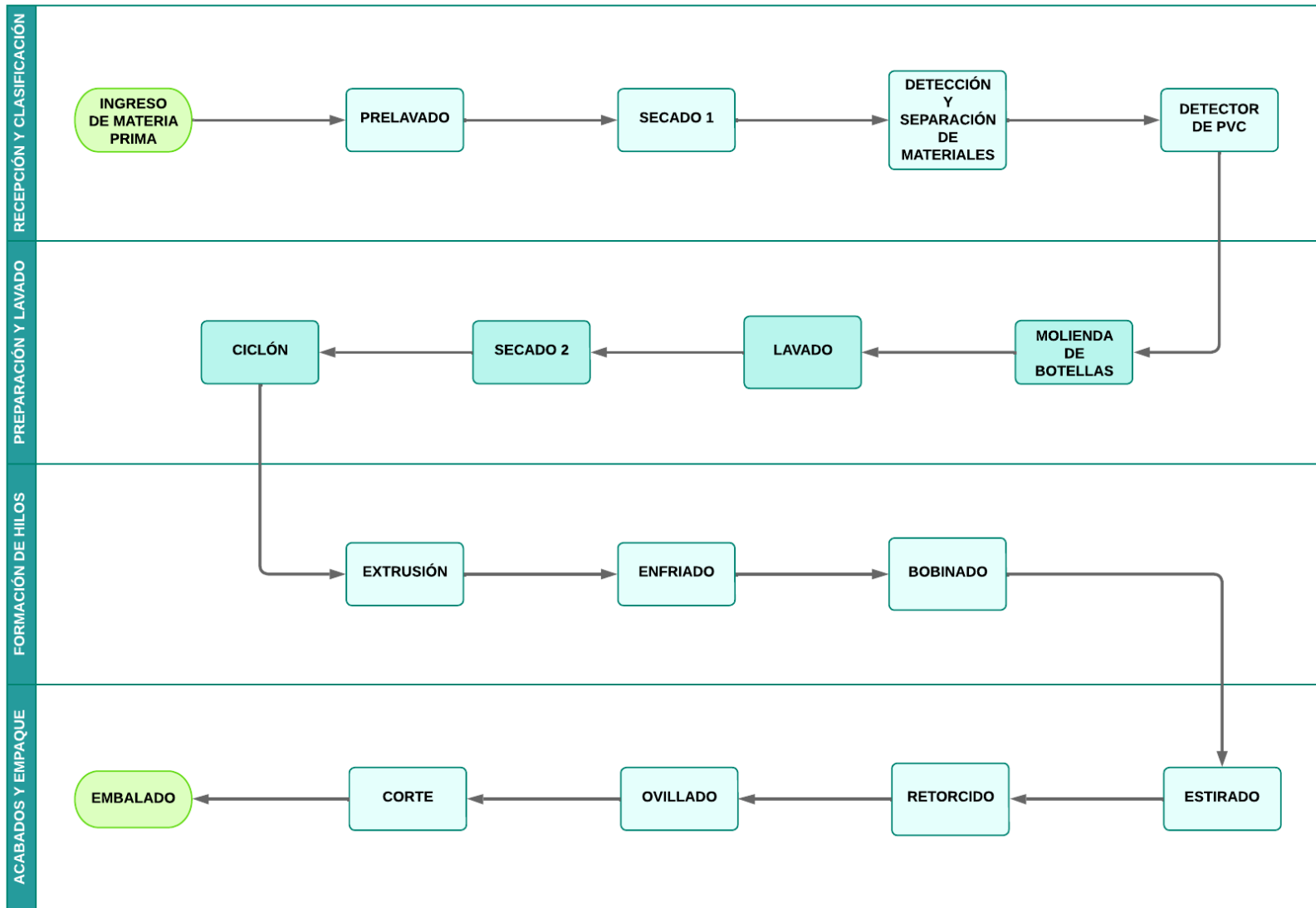
El estirado o alargamiento aumenta la cristalinidad y distribución interna ordenada, reduce el diámetro (disminuyendo por consiguiente el título o denier) y agrupa las moléculas juntándolas más. La cristalinidad y orientación se relaciona con propiedades físicas de la fibra. La resistencia a la abrasión, la elongación, la absorción de humedad, así como la receptividad de la fibra a los colorantes, son algunas de esas propiedades.

Los poliésteres deben estirarse en caliente para que la alineación molecular sea efectiva. Las cadenas moleculares se mantienen unidas entre sí por enlaces cruzados o por fuerzas intermoleculares (llamadas enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals). Las fuerzas son similares a la atracción entre un imán y un trozo de hierro. Mientras más cerca se encuentren las cadenas unas de otras, más fuertes serán los enlaces. El enlace de hidrógeno es la atracción de los átomos positivos de hidrógeno en una cadena, por átomos negativos de oxígeno o nitrógeno de una cadena continua. Las fuerzas de Van der Waals son similares, pero más débiles. La temperatura que se debe aplicar a la fibra, previa del estirado, se establece por encima de los 95-100°C. Entonces, el hilo es arrastrado sobre unos rodillos de goma caliente, por lo que el proceso lo estira y realinea a las moléculas.

**Rizado (crimpado) y secado:** el rizado de la fibra se refiere a las ondas, quiebres, rizos o dobleces a lo largo de la longitud de la misma. Este tipo de ondulación aumenta la cohesión, resiliencia, resistencia a la abrasión, elasticidad, volumen y conservación del calor. El rizado también aumenta la absorbencia y, si bien favorece la comodidad al contacto con la piel, puede reducir el lustre.

Una forma común de rizado es el mecánico, que se imparte a la fibra haciéndola pasar a través de rodillos gravados, torciéndolas o aplanando uno de sus lados. El rizado o crimpado favorece la cohesión. Es decir, la capacidad de las fibras de permanecer juntas durante la hilatura. Además, contribuye a darle resistencia al deshilachado de la tela posteriormente. El hilo, una vez rizado, pasa por un túnel de secado a fin de fijar el rizo en la fibra. La mecha continua se llama ahora tow, quedando lista para la obtención de fibra dándole la longitud de corte deseada (1.5 denier y 3 denier para las mezclas con algodón y rayón respectivamente). El sub-tow, una vez rizado, pasa por un túnel de secado para fijar el rizo en la fibra. También el tow puede ser acondicionado para mezcla con lana si es cortado de manera especial para este fin (unos 6 denier).

## 2.8.DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO



*Figura 1. Diagrama de bloques del proceso de producción de fibra textil con PET reciclado*

## **2.9.PRUEBAS Y PARÁMETROS DE CALIDAD DE LA FIBRA TEXTIL**

El PET reciclado es producido principalmente a partir de botellas de plástico desechadas, que son recolectadas, procesadas y transformadas en fibras utilizables. Este proceso no solo ayuda a reducir la cantidad de residuos plásticos en vertederos y océanos, sino que también ofrece una solución viable para la producción de textiles. Sin embargo, Para garantizar la eficacia y durabilidad de las fibras textiles hechas de PET reciclado, es fundamental que estas cumplan con ciertos parámetros de calidad que aseguren que el material sea competitivo frente a fibras textiles tradicionales y vírgenes. Los principales parámetros de calidad incluyen:

### **2.9.1. Resistencia Mecánica Y Durabilidad**

La resistencia mecánica es uno de los parámetros más críticos al evaluar fibras textiles. Este atributo se refiere a la capacidad de la fibra para soportar fuerzas sin romperse. Las pruebas de tracción son comunes para medir la resistencia y la elongación de las fibras de PET reciclado. Según estudios recientes, las fibras recicladas pueden igualar o incluso superar la resistencia de las fibras vírgenes, lo que las hace adecuadas para diversas aplicaciones textiles (Khan et al., 2020).

La durabilidad, por otro lado, se refiere a la capacidad de la fibra para mantener su rendimiento a lo largo del tiempo, incluso bajo condiciones de uso intensivo. Las pruebas de abrasión y resistencia al desgaste son vitales para este análisis. Un estudio de Al-Azawi (2018) demuestra que las fibras de PET reciclado pueden ofrecer una durabilidad comparable a la de las fibras de poliéster no recicladas.

### **2.9.2. Evaluación De Parámetros De Calidad**

La calidad de la fibra textil hecha de PET reciclado se evalúa a través de diversos parámetros que son esenciales para determinar su idoneidad en diferentes aplicaciones. Cada uno de estos parámetros, como el grosor, la suavidad, el pH, la apariencia y la elasticidad, desempeña un papel crucial en la satisfacción del consumidor y el rendimiento del producto final.

El grosor de la fibra afecta directamente su aplicación y rendimiento en productos textiles. Se mide mediante micrómetros y otros dispositivos especializados. La suavidad, que impacta la comodidad del usuario, se evalúa a través de pruebas sensoriales y mecánicas (Wang, 2016).

La apariencia, que incluye color, brillo y uniformidad, se evalúa mediante inspecciones visuales y análisis de imagen. La resistencia del color a la decoloración, especialmente después del lavado o la exposición a la luz, es crucial para la aceptación del consumidor. Las pruebas de resistencia a la decoloración son esenciales para asegurar que los productos mantengan su atractivo visual a lo largo del tiempo (Smith, 2021).

**Grosor:** el grosor de la fibra textil es un atributo crítico que afecta su rendimiento y aplicación. Se refiere a la medida del diámetro de la fibra y es un indicador de su densidad y resistencia.

El grosor se mide comúnmente utilizando micrómetros o calibres de precisión. En algunos casos, se emplean instrumentos de medición óptica que permiten una evaluación más precisa sin contacto.

Un grosor adecuado es esencial para ciertas aplicaciones, como en la fabricación de prendas de vestir, donde la comodidad y la apariencia son primordiales. Un estudio de Wang (2016) *Performance testing of textiles: Methods, technology and applications* sugiere que el grosor de las fibras de PET reciclado puede ser ajustado durante el proceso de fabricación para satisfacer diferentes requisitos de diseño.

**Suavidad:** la suavidad de la fibra es un parámetro que influye en la comodidad del usuario y en la percepción de calidad del producto textil.

La suavidad se evalúa a través de pruebas sensoriales, donde paneles de expertos o consumidores realizan evaluaciones táctiles. También se pueden utilizar ensayos mecánicos que midan la fricción de la fibra contra una superficie de referencia.

Las fibras de PET reciclado deben tener una suavidad comparable a la de las fibras vírgenes para ser competitivas en el mercado. Según Al-Azawi (2018), la suavidad de estas fibras puede ser mejorada mediante tratamientos químicos o mecánicos durante el procesamiento.

**pH:** es un parámetro fundamental que puede afectar la estabilidad y la durabilidad de la fibra textil. El pH de la fibra se mide utilizando un pH-metro, sumergiendo una muestra de la fibra en una solución acuosa y evaluando el pH resultante.

Un pH adecuado es crucial para evitar reacciones adversas durante el lavado y el uso. Un pH neutro (aproximadamente 7) es ideal para evitar la degradación de la fibra y la irritación en la piel del usuario. La investigación sugiere que las fibras de PET reciclado pueden ajustarse para mantener un pH adecuado (Khan et al., 2020).

**Apariencia:** incluye aspectos como el color, el brillo y la uniformidad, que son vitales para la aceptación del consumidor.

Se utilizan métodos de inspección visual y análisis de imagen para evaluar la apariencia de la fibra. La consistencia en el color y la textura es esencial para la producción de tejidos de alta calidad.

La apariencia impacta directamente la comercialización del producto. Las fibras de PET reciclado deben presentar una apariencia atractiva y uniforme para competir en el mercado textil (Smith, 2021).

**Hidrofobicidad y Absorción de Agua:** la capacidad de la fibra para repeler agua o absorber humedad es un parámetro importante, especialmente para prendas que se usan en condiciones climáticas específicas.

Se pueden realizar pruebas de absorción donde se mide el tiempo que tarda la fibra en absorber agua o se evalúa su comportamiento en condiciones de humedad.

Las fibras de PET reciclado pueden ser tratadas para ser más hidrofóbicas, lo que es ventajoso para aplicaciones deportivas y de outdoor (Smith, 2021).

La evaluación de parámetros de calidad como el grosor, la suavidad, el pH, la apariencia, la elasticidad y otros atributos relevantes es fundamental para asegurar que la fibra textil hecha de PET reciclado cumpla con las expectativas del consumidor y los estándares de la industria. A medida que la demanda de productos sostenibles crece, la investigación y el desarrollo en torno a estos parámetros se volverán cada vez más relevantes, asegurando que las fibras recicladas no solo sean funcionales, sino que también ofrezcan un rendimiento comparable al de las fibras vírgenes.

La industria textil está en constante evolución, especialmente con el aumento de la demanda de materiales reciclados como la fibra de poliéster hecha de PET reciclado. Para garantizar que estos materiales cumplan con los estándares de calidad y sostenibilidad, es fundamental adherirse a normas específicas que guíen las pruebas de calidad y el manejo de estos productos.

### **2.9.3. Normas ISO y ASTM**

Las normas ISO y ASTM juegan un papel fundamental en la estandarización de las pruebas de calidad para la fibra textil reciclada. La norma ISO 9001:2015 establece los criterios para un sistema de gestión de calidad, mientras que la norma ASTM D5034

proporciona un método estandarizado para medir la resistencia y elongación de los tejidos (Khan et al., 2020). Estas normas aseguran que los productos cumplan con requisitos específicos de calidad y sostenibilidad, lo que es esencial para la aceptación en el mercado.

### **Normas ISO aplicables:**

#### **➤ ISO 9001:2015 - Sistemas de Gestión de Calidad**

La norma ISO 9001 establece un marco para la implementación de sistemas de gestión de calidad (SGC) en diversas organizaciones. Esta norma es aplicable a cualquier entidad que busque mejorar sus procesos y garantizar la satisfacción del cliente.

Importancia: Para los productores de fibra de PET reciclado, la certificación ISO 9001 demuestra un compromiso con la calidad y la mejora continua. Esto es crucial para ganar la confianza del consumidor y facilitar la entrada a nuevos mercados. La implementación de un SGC ayuda a identificar áreas de mejora en la producción y a establecer procesos más eficientes.

#### **➤ ISO 14001:2015 - Sistemas de Gestión Ambiental**

Esta norma proporciona directrices para implementar un sistema de gestión ambiental (SGA) que permita a las organizaciones mejorar su desempeño ambiental.

Importancia: La certificación ISO 14001 es especialmente relevante para la producción de fibras recicladas, ya que asegura que las operaciones minimicen el impacto ambiental. Cumplir con esta norma no solo beneficia al medio ambiente, sino que también mejora la imagen de la marca, atrayendo a consumidores que valoran la sostenibilidad.

#### **➤ ISO 1833 - Métodos de Análisis Textil**

Esta norma establece métodos para el análisis de la composición de fibras textiles, permitiendo la identificación de los diferentes tipos de fibras presentes en un producto.

Importancia: Para las fibras recicladas, esta norma es crucial para asegurar la transparencia en la composición del producto, lo que ayuda a los consumidores a tomar decisiones informadas. También es un requisito para cumplir con regulaciones que exigen la correcta identificación de los materiales.

#### **➤ ISO 5077 - Determinación de la Estabilidad Dimensional**

Esta norma especifica un método para determinar la estabilidad dimensional de los tejidos tras el lavado.

Importancia: La estabilidad dimensional es esencial para garantizar que los productos textiles mantengan su forma y tamaño después del uso y lavado. Esto es particularmente relevante para las fibras recicladas, que deben demostrar que pueden competir con las fibras vírgenes en términos de durabilidad.

#### **Normas ASTM aplicables:**

##### **➤ ASTM D5034 - Prueba de Resistencia de Tejidos**

La norma ASTM D5034 establece un método para medir la resistencia y elongación de los tejidos.

Importancia: Esta norma es esencial para evaluar la durabilidad y la resistencia de las fibras de PET reciclado, permitiendo a los productores asegurar que sus productos cumplan con los estándares de calidad requeridos en el mercado. La comparación de los resultados con las fibras vírgenes permite validar el rendimiento de las fibras recicladas.

##### **➤ ASTM D4157 - Prueba de Resistencia a la Abrasión**

La norma ASTM D4157 especifica un método para evaluar la resistencia al desgaste de los tejidos.

La resistencia a la abrasión es un factor crucial en la durabilidad de las fibras textiles. Esta norma ayuda a determinar cómo se comportan las fibras de PET reciclado bajo condiciones de uso real, asegurando que puedan mantener su integridad y apariencia a lo largo del tiempo.

##### **➤ ASTM D5035 - Prueba de Resistencia a la Tensión**

La norma ASTM D5035 establece un método para medir la resistencia a la tensión de las fibras textiles.

Este parámetro es fundamental para determinar la capacidad de las fibras de PET reciclado para soportar fuerzas sin romperse, lo cual es esencial en aplicaciones donde la resistencia mecánica es crítica.

La adherencia a las normas ISO y ASTM es fundamental para la producción de fibra textil hecha de PET reciclado. Estas normas aseguran que los productos cumplan con criterios

específicos de calidad, seguridad y sostenibilidad. Además, el cumplimiento de estas regulaciones no solo mejora la competitividad de las fibras recicladas en el mercado, sino que también contribuye a la confianza del consumidor y a la percepción positiva de la marca.

A medida que la industria textil continúa evolucionando hacia la sostenibilidad, la implementación de estas normas será crucial para la viabilidad de las fibras de PET reciclado en el futuro.

#### **2.9.4. Métodos de Prueba de Color y Resistencia a la Decoloración en Fibras Textiles Recicladas**

La evaluación del color y la resistencia a la decoloración es crucial para las fibras textiles, especialmente en aquellas hechas de PET reciclado. Estos atributos no solo afectan la estética del producto final, sino que también influyen en su durabilidad y aceptación en el mercado. A continuación, se describen los métodos de prueba relevantes para evaluar el color y la resistencia a la decoloración de las fibras textiles recicladas, basados en normativas y referencias actualizadas.

##### **Métodos de Prueba de Color**

**Medición de Color con Espectrofotometría:** la espectrofotometría es un método común para medir el color de las fibras textiles. Se utiliza un espectrofotómetro para cuantificar el color en términos de coordenadas tridimensionales (por ejemplo, CIELAB).

La muestra de fibra se coloca en el espectrofotómetro, que mide la reflectancia a diferentes longitudes de onda. Los resultados se expresan en términos de valores  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , que representan la luminosidad y las componentes de color rojo-verde y amarillo-azul, respectivamente.

Este método proporciona una medida precisa y cuantificable del color, permitiendo comparaciones consistentes entre diferentes lotes de producción.

**Prueba de Color en Seco y Prueba de Resistencia al Lavado (ISO 105-C06):** este método evalúa la resistencia del color a la acción del detergente durante el lavado. La muestra se lava bajo condiciones controladas con un detergente específico y se evalúa la decoloración utilizando una escala de grises.

La resistencia al lavado es esencial para determinar la durabilidad del color en prendas de vestir y otros textiles que se lavan regularmente.

**Prueba de Color en Húmedo:** este método evalúa la solidez del color en condiciones de contacto. Se utiliza un paño blanco de algodón que se frota contra la muestra de fibra, tanto en seco como en húmedo. Posteriormente, se evalúa la transferencia de color al paño utilizando una escala de grises. Este método es esencial para determinar la resistencia del color ante el uso cotidiano, especialmente en prendas que se lavan frecuentemente.

### **Métodos de Prueba de Resistencia a la Decoloración**

**Prueba de Resistencia al Lavado (ISO 105-C06):** este método evalúa la resistencia del color a la acción del detergente durante el lavado. La muestra se lava bajo condiciones controladas con un detergente específico y se evalúa la decoloración utilizando una escala de grises.

La resistencia al lavado es esencial para determinar la durabilidad del color en prendas de vestir y otros textiles que se lavan regularmente.

**Prueba de Resistencia a la Decoloración por Agentes Químicos (ISO 105-E03):** este método evalúa la decoloración de las fibras cuando se exponen a productos químicos, como blanqueadores y detergentes.

Las muestras se tratan con soluciones químicas específicas y se evalúan por la decoloración resultante. Este método es crucial para asegurarse de que las fibras mantengan su color incluso después de la exposición a productos de limpieza comunes.

### **Nuevos métodos y avances**

**Prueba de Resistencia a la Decoloración por Fricción (ISO 105-X12):** este método mide la resistencia del color a la fricción, tanto en seco como en húmedo. Se utiliza un dispositivo que aplica fricción a la muestra, y luego se evalúa la transferencia de color. Se frota muestras del tejido con un paño seco y con un paño húmedo. La máquina proporciona dos combinaciones de condiciones de prueba a través de dos tamaños alternativos de dedo frotador: uno para telas de pelo y otro para telas de colores sólidos o estampados grandes. La resistencia a la fricción es fundamental para productos que están sujetos a uso intensivo, como ropa de trabajo y textiles para el hogar.

**Evaluación de la Decoloración en Condiciones Ambientales (ISO 105-B02):** este método evalúa la resistencia del color en condiciones de humedad y temperatura controladas. Las muestras se exponen a condiciones específicas de temperatura y humedad durante un período, seguido de una evaluación de la decoloración.

Este método es crucial para productos que se almacenan en condiciones variables o que están expuestos a cambios ambientales. La evaluación del color y la resistencia a la decoloración de las fibras textiles recicladas es fundamental para asegurar la calidad y durabilidad de los productos finales. Los métodos descritos, que cumplen con las normativas ISO y ASTM, son esenciales para garantizar que las fibras de PET reciclado puedan competir en el mercado, proporcionando un rendimiento comparable al de las fibras vírgenes.

A medida que la demanda de productos sostenibles continúa creciendo, la aplicación de estos métodos se volverá aún más relevante, asegurando que los textiles reciclados cumplan con las expectativas del consumidor en términos de calidad y durabilidad (Khan et al., 2020).

## **2.10. SOSTENIBILIDAD EN EL APROVECHAMIENTO DEL PET**

### **2.10.1. Sostenibilidad Social**

La industria textil enfrenta desafíos significativos en el contexto actual de creciente preocupación por la sostenibilidad y el impacto ambiental de sus prácticas. La producción textil convencional, que utiliza fibras vírgenes, contribuye considerablemente a la contaminación, el consumo de recursos naturales y la generación de residuos. En este contexto, el reciclaje de materiales, especialmente del poliéster derivado del tereftalato de polietileno (PET), se presenta como una solución viable que no solo reduce la carga ambiental, sino que también promueve un modelo de economía circular (Smith, 2021).

La generación de empleo y la mejora de las condiciones laborales son cruciales para el desarrollo de una industria textil sostenible. Según Smith (2021), el reciclaje de textiles no solo crea oportunidades laborales, sino que también promueve condiciones de trabajo justas y seguras. Las memorias de responsabilidad social corporativa (RSC) son herramientas esenciales que permiten a las empresas comunicar sus esfuerzos en sostenibilidad social y rendir cuentas ante sus partes interesadas.

Además, el reciclaje textil está alineado con las metas de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, particularmente con la meta 8, que busca promover el trabajo decente y el crecimiento económico, y la meta 12, que se enfoca en la producción y el consumo responsables. Estas metas enfatizan la importancia de integrar prácticas sostenibles en todos los aspectos de la producción textil, desde la recolección de materiales hasta la fabricación y distribución.

#### **Creación de Oportunidades Laborales**

El reciclaje de PET contribuye significativamente a la creación de empleos en diversas etapas de la cadena de suministro. Desde la recolección de botellas de PET hasta su transformación en fibras textiles, cada etapa requiere mano de obra. Al-Azawi (2018) señala que el reciclaje de botellas puede generar miles de empleos, especialmente en comunidades donde las oportunidades laborales son escasas. Este fenómeno no solo ayuda a reducir la tasa de desempleo, sino que también promueve un sentido de comunidad y cohesión social.

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible presenta una oportunidad única para alinear los esfuerzos de reciclaje con los objetivos globales. La meta 8.5 busca lograr el

empleo pleno y productivo, lo que se puede lograr mediante la creación de empleos en el sector del reciclaje. Además, la meta 12.5 promueve la reducción de desechos a través de la prevención, el reciclaje y la reutilización, lo que se alinea directamente con las prácticas de reciclaje textil (Freeman et al., 2021).

La generación de empleo y la mejora de las condiciones de trabajo son aspectos fundamentales para la sostenibilidad social en la industria textil reciclada. Al promover la creación de oportunidades laborales y mejorar las condiciones de trabajo, el reciclaje de PET no solo contribuye a un entorno más sostenible, sino que también crea un impacto positivo en las comunidades. Integrar estos principios en las prácticas empresariales y alinearlos con los objetivos de la Agenda 2030 es esencial para construir un futuro más justo y sostenible.

### **Desarrollo de Habilidades**

La industria del reciclaje también se enfoca en el desarrollo de habilidades técnicas y profesionales. Según Khan et al. (2020), muchas iniciativas de reciclaje ofrecen formación especializada para los trabajadores en procesos de separación, limpieza y transformación de materiales. Esta capacitación no solo eleva el nivel de competencia de la fuerza laboral, sino que también mejora las perspectivas de empleo a largo plazo, contribuyendo así al crecimiento económico local.

### **Innovación y Emprendimiento**

El reciclaje textil no solo se limita a grandes empresas; también fomenta el emprendimiento. Nuevas startups y pequeñas empresas están surgiendo en el sector del reciclaje, impulsadas por la demanda de productos sostenibles. Wang (2016) destaca cómo estas iniciativas pueden crear un ecosistema de innovación, generando aún más empleo y estimulando la economía local.

### **Mejora en Condiciones de Trabajo**

- **Estándares Laborales Justos:** la mejora en las condiciones de trabajo es un componente esencial de la sostenibilidad social en la industria textil. Las iniciativas de reciclaje a menudo se implementan con un enfoque en la justicia laboral, asegurando que los trabajadores reciban salarios justos y beneficios. Como señala Smith (2021), muchas empresas que adoptan prácticas de reciclaje también se comprometen a cumplir con estándares laborales más elevados, lo que mejora la calidad de vida de los trabajadores.

- **Salud y Seguridad:** la salud y la seguridad en el lugar de trabajo son factores críticos que afectan la calidad de vida de los trabajadores. En la industria del reciclaje, se están implementando mejores prácticas para garantizar un entorno laboral seguro. Esto incluye la capacitación en el uso de equipos y la implementación de protocolos de seguridad. Según Khan et al. (2020), las empresas que se dedican al reciclaje de textiles a menudo invierten en la mejora de las condiciones de trabajo, lo que resulta en menos accidentes y enfermedades laborales.
- **Inclusión Social:** el reciclaje textil también puede promover la inclusión social, brindando oportunidades a grupos marginados. Las iniciativas que se centran en el reciclaje suelen incluir a mujeres y jóvenes, quienes a menudo enfrentan barreras para acceder al empleo. La creación de programas específicos para estos grupos no solo mejora su situación económica, sino que también empodera a las comunidades y promueve la equidad de género.

### **Memoria de Responsabilidad Social Corporativa en la Industria Textil Reciclada**

La memoria de RSC es un informe que documenta y comunica las políticas, prácticas y resultados de una empresa en relación con su impacto social y ambiental. Este documento es fundamental para la transparencia y la rendición de cuentas, permitiendo a las partes interesadas, incluidos empleados, clientes, inversionistas y comunidades, evaluar el compromiso de la empresa con la sostenibilidad.

Se ha convertido en un componente esencial para las empresas de la industria textil, particularmente en el contexto del reciclaje. A medida que las preocupaciones sobre la sostenibilidad y el impacto ambiental de esta industria crecen, las empresas se ven impulsadas a adoptar prácticas más responsables. La memoria de RSC es una herramienta clave que permite a las empresas comunicar sus esfuerzos en sostenibilidad social y ambiental, alineándose con los desafíos y objetivos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Su propósito incluye:

**Transparencia:** Proporcionar información clara sobre las operaciones y el impacto de la empresa en la sociedad y el medio ambiente.

**Rendición de cuentas:** Establecer mecanismos para que las empresas respondan a las preocupaciones de las partes interesadas.

Mejora continua: Identificar áreas de mejora y establecer metas para el futuro, alineándose con estándares internacionales y objetivos de desarrollo sostenible.

### **Contribución a la Agenda 2030**

La memoria de RSC debe alinearse con los ODS de la Agenda 2030, particularmente:

- Meta 8.5: Lograr el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos.
- Meta 8.6 Reducción de los jóvenes sin trabajo ni estudios.
- Meta 12.5: Reducir significativamente la generación de desechos a través de la prevención, el reciclaje y la reutilización.
- Meta 17.17: Fomentar y promover asociaciones efectivas para el desarrollo sostenible.

Al integrar estas metas en sus memorias, las empresas no solo demuestran su compromiso con la sostenibilidad, sino que también contribuyen a un esfuerzo colectivo para abordar los desafíos globales.

### **2.10.2. Sostenibilidad Ambiental**

#### **Ley de Medio Ambiente de El Salvador**

La sostenibilidad ambiental en la producción de fibras sintéticas a partir de PET reciclado no solo abarca la reducción de desechos plásticos, sino también un conjunto de acciones que integran el manejo responsable de los recursos naturales y la mitigación de la contaminación. Al utilizar el PET reciclado, se reduce significativamente la cantidad de plástico que podría acabar en vertederos o, peor aún, en cuerpos de agua y ecosistemas naturales, donde estos materiales tardan cientos de años en descomponerse. De acuerdo con el Artículo 1 de la Ley de Medio Ambiente de El Salvador, la protección, conservación y recuperación del medio ambiente, así como el uso sostenible de los recursos naturales, son fundamentales para mejorar la calidad de vida tanto de las generaciones presentes como de las futuras. Esto refleja la importancia de buscar alternativas a la producción de plásticos vírgenes mediante el reciclaje, lo que no solo evita que el PET desechado se convierta en un contaminante, sino que le da un nuevo uso en la fabricación de textiles.

En términos de conservación de recursos no renovables, el reciclaje de PET juega un papel crucial, ya que disminuye la dependencia del petróleo, que es la base para la producción de plástico virgen. En lugar de extraer continuamente nuevos recursos

naturales, el reciclaje permite reutilizar materiales existentes, cerrando el ciclo de vida del plástico en una economía circular. Esta es una medida clara que aborda el principio de desarrollo sostenible que menciona el Artículo 2 de la Ley de Medio Ambiente, donde se subraya la importancia de asegurar la disponibilidad y calidad de los recursos naturales y equilibrar el desarrollo económico con el bienestar ambiental. Además, este artículo destaca la obligación de la sociedad y del Estado de reponer o compensar los recursos que se consumen, una clara referencia a la necesidad de adoptar prácticas como el reciclaje para mitigar el impacto sobre los recursos finitos del planeta.

El reciclaje de PET también contribuye a mitigar el problema de los microplásticos, pequeñas partículas plásticas que se desprenden de productos sintéticos, especialmente durante su uso o lavado, y que terminan contaminando los océanos y otros ecosistemas. Estas partículas no solo afectan la fauna marina, sino que también pueden llegar a las cadenas alimenticias de los seres humanos. En este contexto, el Artículo 5 de la Ley establece la necesidad de prevenir la contaminación mediante el manejo adecuado de los recursos naturales y la promoción de prácticas sostenibles. El reciclaje de PET para la creación de fibras textiles es una acción concreta que puede reducir la liberación de microplásticos al medio ambiente, evitando así uno de los mayores problemas de contaminación emergente.

La Ley de Medio Ambiente también impulsa la adopción de tecnologías más limpias y la optimización de los recursos. El Artículo 32 menciona específicamente la importancia de desarrollar programas de incentivos y desincentivos para la reconversión de procesos industriales contaminantes, fomentando el uso de tecnologías sostenibles como el reciclaje de plásticos. Estos programas facilitan la transición hacia una producción más responsable, promoviendo que las empresas adopten medidas más amigables con el medio ambiente, como el reciclaje del PET, en lugar de continuar con la producción de plásticos vírgenes que incrementan la huella ecológica.

Por otro lado, el Artículo 52 refuerza la necesidad de desarrollar programas que promuevan la adecuada gestión de los desechos sólidos, una cuestión directamente relacionada con la problemática de los plásticos. La formulación de programas nacionales que incentiven la reducción en la fuente, el reciclaje y la reutilización de los plásticos, como el PET, es crucial para enfrentar el desafío del manejo de residuos en un país que, como El Salvador, también enfrenta presiones de desarrollo económico. La

implementación de estos programas no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también genera oportunidades para el desarrollo de nuevas industrias y empleos relacionados con el reciclaje y la reutilización de materiales, aportando así beneficios económicos adicionales.

También es importante resaltar que el reciclaje de PET, cuando se aplica de manera adecuada y eficiente, ayuda a alinear los objetivos de desarrollo económico con los principios de protección ambiental. Este enfoque está en concordancia con los objetivos planteados en los artículos mencionados de la Ley de Medio Ambiente, que busca armonizar el crecimiento económico con el cuidado de los ecosistemas, en particular a través de la prevención de la contaminación, el uso eficiente de los recursos y la adopción de tecnologías sostenibles. Así, la producción de fibras textiles a partir de PET reciclado se posiciona como una solución efectiva para reducir la contaminación, conservar los recursos y avanzar hacia una industria textil más sostenible y responsable.

### **Propuesta de Ley para la Prevención de la Contaminación por Plásticos de un Solo Uso.**

El reciclaje de plásticos, particularmente el tereftalato de polietileno (PET), es una de las estrategias más importantes para promover la sostenibilidad ambiental, ya que proporciona una solución eficaz para reducir la contaminación plástica. La transformación de PET reciclado en fibras sintéticas, como el poliéster reciclado, es una alternativa que disminuye significativamente la cantidad de desechos plásticos que se acumulan en vertederos o que contaminan ecosistemas terrestres y marinos. Este enfoque está alineado con los principios de la *Ley para la Prevención de la Contaminación por Plásticos de un Solo Uso*, la cual establece un marco regulatorio para la reducción progresiva de la producción y el consumo de plásticos de un solo uso, buscando reemplazarlos por alternativas reutilizables o cuya degradación no genere contaminación (Propuesta de Ley para la Prevención de la Contaminación por Plásticos de un Solo Uso, 2022, art. 1).

La prohibición progresiva de productos fabricados con plásticos de un solo uso, como el PET, es una medida crucial para reducir su impacto ambiental. En el artículo 7 de la ley, se menciona específicamente la restricción de productos como bandejas, envases, vasos y recipientes hechos con PET y polipropileno (PP), entre otros, destacando la necesidad de eliminar estos productos del mercado en un período determinado. Este tipo de medidas incentiva a las industrias a adoptar prácticas más sostenibles, como el reciclaje del PET,

para reducir la contaminación plástica y la dependencia de plásticos vírgenes (Propuesta de Ley para la Prevención de la Contaminación por Plásticos de un Solo Uso, 2022, art. 7).

El proceso de reciclaje del PET no solo evita la disposición inadecuada de los plásticos, sino que también reduce el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero, al reemplazar la producción de plástico virgen. Este enfoque está alineado con los principios de sustentabilidad y prevención de daños ambientales establecidos en el artículo 4 de la ley, que resalta la importancia de implementar medidas preventivas y promover alternativas que minimicen el daño al medio ambiente (Propuesta de Ley para la Prevención de la Contaminación por Plásticos de un Solo Uso, 2022, art. 4). Además, el reciclaje de PET fomenta la economía circular, ya que transforma residuos en recursos reutilizables, promoviendo el ciclo de vida extendido de los materiales.

En el artículo 11 de la ley se establece un plazo de 18 meses para la eliminación progresiva de productos plásticos como vasos, tapas, cubiertos y envases de PET y PP, lo que obliga a los productores y comerciantes a buscar alternativas más sostenibles (Propuesta de Ley para la Prevención de la Contaminación por Plásticos de un Solo Uso, 2022, art. 11). Esto abre la puerta al desarrollo de fibras sintéticas a partir de PET reciclado, que no solo disminuye la demanda de nuevos plásticos, sino que también ofrece una solución práctica y escalable para el sector textil, donde se pueden utilizar estas fibras en la fabricación de ropa, tapicería y otros productos.

La transformación de PET reciclado en fibras sintéticas cumple con el principio de "prevención en la fuente", descrito en el artículo 4, que sugiere que la generación de desechos plásticos debe ser prevenida desde la fuente misma, lo que hace del reciclaje una estrategia fundamental para evitar la acumulación de residuos y reducir su manejo posterior (Propuesta de Ley para la Prevención de la Contaminación por Plásticos de un Solo Uso, 2022, art. 4).

### **2.10.3. Sostenibilidad Económica**

#### **Reducción de costos de producción**

El uso de PET reciclado como materia prima en la producción de fibras textiles ofrece una alternativa económica frente a los polímeros vírgenes derivados del petróleo. Este material, proveniente principalmente de botellas de plástico desechadas, representa una fuente abundante y de bajo costo comparado con las materias primas tradicionales.

El proceso de reciclaje de PET no solo disminuye la dependencia de recursos no renovables, sino que también reduce los costos asociados a la extracción, transporte y refinamiento del petróleo, que son etapas costosas y con alta demanda energética. Además, la revalorización de residuos plásticos a través de su transformación en fibras textiles permite reducir los costos en la cadena de producción, ya que el reciclaje ofrece un acceso más económico a materias primas procesadas.

En términos de rentabilidad, las empresas que integran el uso de PET reciclado en sus procesos de fabricación pueden beneficiarse de incentivos económicos, como subsidios gubernamentales o reducciones fiscales, diseñados para fomentar el uso de materiales reciclados. Asimismo, el costo de adquirir pet reciclado tiende a ser más estable en comparación con el de los polímeros vírgenes, que puede fluctuar de acuerdo con los precios internacionales del petróleo.

Finalmente, la adopción del reciclaje de PET no solo representa una ventaja económica en la adquisición de materia prima, sino que también contribuye a una imagen corporativa positiva, ya que cada vez más consumidores buscan productos sostenibles, lo que aumenta la competitividad en el mercado global.

### **Marco mundial del consumo de fibras textiles**

El consumo mundial de fibras textiles ha mostrado un crecimiento sostenido en las últimas décadas, impulsado por la expansión de la industria de la moda y la creciente demanda de productos textiles en diversas aplicaciones. Las fibras sintéticas, especialmente el poliéster derivado de PET, han dominado el mercado textil global debido a su bajo costo, durabilidad y versatilidad.

Según datos recientes, más del 60% de las fibras textiles producidas en el mundo son sintéticas, siendo el poliéster la fibra más utilizada. Esta tendencia se ha acentuado con la creciente demanda de ropa rápida ("fast fashion"), que requiere materiales de bajo costo y de fácil producción para satisfacer un mercado que busca renovar constantemente su inventario. Sin embargo, este modelo también ha generado una presión significativa sobre el medio ambiente, debido a la dependencia de los polímeros vírgenes y el impacto ecológico del ciclo de vida de estas fibras.

En este contexto, el PET reciclado ha ganado importancia como una solución sostenible, integrándose de manera creciente en la producción de textiles. Países con economías avanzadas en el reciclaje, como Alemania, Japón y China, han liderado la integración de PET reciclado en la industria textil, reduciendo la dependencia de fuentes vírgenes y

fomentando una economía circular. Además, la creciente conciencia ambiental ha generado una mayor demanda por fibras textiles producidas a partir de materiales reciclados, impulsando nuevas iniciativas globales que buscan regular y fomentar el uso de estas fibras en la cadena productiva textil.

El marco regulatorio internacional, impulsado por acuerdos como la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, incluye objetivos claros para la promoción de la producción y consumo responsable, lo que está acelerando la transición hacia el uso de fibras textiles recicladas. En este sentido, el PET reciclado juega un rol central, ya que permite no solo satisfacer la demanda global de fibras, sino hacerlo de una manera que minimiza los impactos ambientales negativos, promoviendo la sostenibilidad en el largo plazo.

## CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

### 3.1.METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La investigación es de tipo exploratoria esperando tener datos que permitan identificar oportunidades de mejora relacionadas al aprovechamiento de residuos sólidos con enfoque de economía circular, para ello, se realizará un ensayo a escala de laboratorio para comprobar la viabilidad de producir fibra textil a partir de plástico reciclado. La materia prima para este experimento será obtenida del producto rechazado en una empresa que se dedica a la fabricación de botellas de PET, garantizando el uso de material que no ha sido usado y será desechado, dándole un valor agregado, cumpliendo con los propósitos de la economía circular para un desarrollo sostenible de procesos industriales. Utilizando el material recolectado, se replicarán a pequeña escala las etapas de transformación descritas en el marco teórico de este estudio. Se tomarán en cuenta diferentes parámetros y resultados para evaluar la calidad de la fibra obtenida, lo que permitirá verificar, en un entorno controlado, la factibilidad del reciclaje de PET para la producción de fibras textiles.

#### 3.1.1. Materiales Y Equipo

*Tabla 2. Materiales y equipo para la realización del experimento*

<b>Material y Equipo</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Plástico PET (botellas de plástico)</b>	0.5 kg
<b>Agua de chorro</b>	10 litros
<b>Balanza normal no analítica</b>	1
<b>Bolsas plásticas</b>	5
<b>Etiquetas de identificación</b>	10
<b>Hotplate</b>	1
<b>Olla de 5 litros</b>	1
<b>Detergente liquido</b>	50 ml
<b>Termómetro</b>	1
<b>Mechero Bunsen</b>	1
<b>Chispero</b>	1
<b>Horno</b>	1
<b>Tijera</b>	1

<b>Contenedor de 5 litros</b>	1
<b>Colador de malla fina</b>	1
<b>Agitador magnético</b>	1
<b>Rollo de papel absorbente</b>	1
<b>Bandeja</b>	2
<b>Caja de guante</b>	1
<b>Mascarilla</b>	6
<b>Espatula</b>	1
<b>Porta muestra de aluminio</b>	1
<b>Cronometro</b>	1
<b>Sensor de Humedad</b>	1
<b>Libreta de notas</b>	1
<b>Herramientas de acople (tabla con clavos)</b>	1

### 3.1.2. Procedimiento

#### Etapa 1 – CORTADO

**Objetivo:** Reducir el tamaño de la materia prima (botellas de plástico reciclado) mediante cortado manual, obteniendo fragmentos de diferentes tamaños para analizar su influencia en el tiempo de fundición.

#### Inspección visual.

- Comprobar que las botellas sean homogéneas en cuanto a material y color.
- Identificar y descartar las botellas con material diferente al PET.

#### Reducción de Tamaño de Muestra

- Usar tijeras de mano para cortar las botellas, separando el cuerpo de la botella del resto.
- Utilizar una regla graduada para medir y asegurar que los fragmentos sean uniformes.
- Cortar hasta obtener la cantidad de fragmentos de tamaño deseado.

#### Pesaje y Almacenamiento de Muestras

- Pesar 70g de material utilizando una balanza de precisión.

- Colocar los fragmentos en una bolsa plástica transparente.
- Etiquetar las bolsas con un plumón para su identificación.
- Guardar las bolsas en un lugar seco, con temperatura ambiente, hasta su uso en la etapa de fundición.

*Tabla 3. Clasificación de muestras*

<b>Peso de muestra</b>	<b>Numero de muestras obtenidas</b>	<b>Etiqueta de muestras</b>
<b>70.0g</b>	2	Linea 1 - L
<b>70.0g</b>		Linea 1 - S
<b>70.0g</b>	1	Linea 2 - Mezcla

## **Etapa 2 – LAVADO**

**Objetivo:** El lavado de PET es un proceso esencial para la remoción de impurezas y contaminantes. Este procedimiento mejora la calidad de la materia prima, eliminando residuos como polvo, arenilla, etiquetas y otros contaminantes, lo que asegura un PET de mayor pureza.

### **Preparación de agua de lavado**

- Llenar el recipiente plástico de 5 litros con agua de chorro hasta el 50% de su capacidad (aproximadamente 2.5 litros).
- Agregar 40g de detergente al agua.
- Usar un agitador para mezclar el detergente y el agua hasta obtener una solución homogénea, asegurando que el detergente esté completamente disuelto.
- Medir y registrar la temperatura inicial del agua.

*Tabla 4. Parámetros de preparación para agua de lavado*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Valor medido</b>
<b>Volumen de agua</b>	Mililitros	
<b>Volumen de solución detergente</b>	Mililitros	
<b>Temperatura ambiente</b>	°C	
<b>Temperatura del agua</b>	°C	
<b>Tiempo de mezcla</b>	Min	
<b>Detalle de la solución</b>	homogénea	
<b>Observaciones adicionales</b>		

## Lavado de PET cortado

- Agregar los 70.0 gramos de PET cortado al recipiente con la solución de detergente mezclada, asegurándose de cubrir completamente el material.
- Agitar manualmente durante 5 minutos para realizar la remoción de contaminantes adheridos al PET así como plásticos remanentes.
- Verificar visualmente la limpieza del material al final del tiempo, observando si se han eliminado los residuos indeseables.

*Tabla 5. Parámetros para proceso de lavado*

Parámetro	Unidad de medida	Valor medido
Cantidad de PET	Gramos	
Cantidad de solución utilizada	Mililitros	
Tiempo de agitación	Min	
Temperatura del agua durante el lavado	°C	

## Filtración

- Después de los 5 minutos de lavado, colocar el colador de malla fina sobre otro recipiente de aproximadamente 5 litros (puede ser de mayor capacidad).
- Verter la solución para separar el PET triturado del agua sucia (Se recomienda utilizar un colador con una malla de 1 mm de apertura para retener el PET triturado, pero si el tamaño del PET triturado es más pequeño, se puede utilizar una malla de 0.5 mm).
- Desechar el agua residual en un sistema de eliminación adecuado para residuos líquidos o, si es posible, tratar el agua para reutilización en procesos futuros.

*Tabla 6. Parámetros para proceso de filtración*

Parámetro	Unidad	Valor medido
Cantidad de agua filtrada	Mililitros	
Tiempo de filtración	Min	
Cantidad de PET filtrado	Gramos	

## Enjuague

- Enjuagar bien el recipiente de lavado para eliminar cualquier residuo de detergente y llenarlo nuevamente con agua de chorro hasta aproximadamente el 50% de su capacidad (2.5 litros).
- Colocar el PET cortado en el recipiente con agua limpia. Agitar durante 5 minutos para asegurar que cualquier residuo de detergente o contaminante soluble sea eliminado.
- Filtrar nuevamente el PET cortado utilizando el colador para separarlo del agua de enjuague.
- Si al final del enjuague persisten residuos visibles en el PET, repetir el proceso de lavado y enjuague hasta que el PET se observe limpio y libre de contaminantes visibles.

*Tabla 7. Parámetros para proceso de enjuague*

Parámetro	Unidad	Valor de medido
Volumen de agua utilizado	Litros	
Tiempo de agitación	Min	
Temperatura ambiente	°C	
Temperatura del agua	°C	
Numero de repeticiones de enjuague	-	

## Etapa 3 – SECADO

**Objetivo:** El secado del PET cortado es un paso esencial para eliminar cualquier resto de humedad tras el lavado. La existencia de agua en el PET puede impactar negativamente su calidad, especialmente en las etapas de fundición y extrusión, ya que la humedad residual puede dar lugar a la formación de burbujas y a defectos en el material.

### Eliminación de Agua Superficial

- Extender el PET sobre una hoja de papel absorbente (Servilletas, papel toalla kleenex), distribuyéndolo uniformemente en una capa delgada de aproximadamente 0.5cm de grosor. Esto maximiza la superficie de contacto y permite una mejor absorción del agua.

- Dejar el PET reposar sobre el papel absorbente y a temperatura ambiente durante aproximadamente 5 minutos para permitir que el papel absorba la mayor cantidad de agua superficial posible. Si el PET parece estar muy húmedo, puede extenderse el tiempo hasta 10 minutos.

### **Configuración del Horno**

- Calentar el horno a una temperatura de 70-80°C. Esta temperatura permitirá evaporar el agua sin riesgo de deformación o fusión del PET.
- Asegurarse de que la temperatura interna sea la adecuada antes de introducir el PET.

*Tabla 8. Parámetros de preparación de horno para secado de muestras*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Valor medido</b>
<b>Temperatura esperada</b>	°C	
<b>Temperatura obtenida en el horno</b>	°C	
<b>Tiempo para alcanzar la temperatura</b>	Min	
<b>Observaciones adicionales</b>		

### **Distribución del PET en la Bandeja**

- Transferir el PET cortado a una bandeja de acero inoxidable, asegurándose de que esté en una capa uniforme de aproximadamente 0.5cm de grosor.
- Evitar la formación acumulaciones, ya que estas pueden dificultar un secado homogéneo.
- Colocar la bandeja en el horno, asegurándose de que el PET esté distribuido uniformemente.

### **Proceso de Secado**

- Mantener el PET en el horno a 70-80°C durante 30 minutos. Considerar que este tiempo puede variar según la cantidad de PET y la capacidad de secado del horno.
- A intervalos de 10 minutos, abrir ligeramente el horno (si es posible) para verificar si el secado es uniforme.

- Tomar una muestra de PET y con la ayuda de una balanza de secado, verificar la humedad de la muestra.

*Tabla 9. Parámetros para proceso de secado*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Valor medido</b>
<b>Tiempo de secado</b>	Min	
<b>Temperatura del horno</b>	°C	
<b>Peso final del PET luego del secado</b>	Gramos	
<b>Humedad Final</b>		

### **Enfriamiento y Verificación Final**

- Una vez transcurrido el tiempo de secado, retirar la bandeja del horno y dejar que el PET se enfríe a en un desecador durante 10 minutos antes de manipularlo.

### **Etapa 4 – FUNDICIÓN DEL PET**

**Objetivo:** Fundir PET reciclado a una temperatura superior a 200 grados Celsius con el fin de transformar el material en una forma maleable que permita su posterior extrusión y procesamiento para la obtención de fibras textiles.

#### **Cargar el PET en el horno de fusión u olla de calentar**

- Cargar 70.0g de PET cortado en una olla previamente calentada.
- Asegurarse de que el material esté distribuido de manera uniforme en el interior de la olla.

#### **Ajuste de temperatura**

- Supervisar que se mantenga una temperatura constante durante todo el proceso de fundición (En caso de que se utilice una olla o hotplate se estará controlando la temperatura del PET fundido con un termómetro).
- Mientras el PET está fundiéndose se le harán agujeros a la lata que estará ajustada al taladro.
- Observar el estado del material para asegurarse de que todo el PET se funde de forma uniforme sin que queden partes sólidas.

*Tabla 10. Parámetros para proceso de fundición*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Resultado</b>
<b>Temperatura de fundición del PET</b>	°C	
<b>Tiempo de fundición</b>	min	

## **ETAPA 5 – FORMACIÓN DE HILOS**

### **Formación del hilo a partir del PET fundido**

- Mantener la temperatura del PET fundido por encima de 200°C durante la formación de hilos para evitar solidificación prematura.
- Coloque cuidadosamente la tabla con los clavos dentro de la olla.
- Eleve la tabla gradualmente para generar los hilos, ajustándolos hasta alcanzar la longitud deseada.
- Repita el procedimiento hasta agotar la totalidad del PET fundido.

### **Enfriamiento de las fibras extruidas**

- Dejar que se enfríe por si sola a temperatura ambiente.

## **ETAPA 6 – BOBINADO DE FIBRAS**

### **Enfriamiento y bobinado de las Fibra**

- Asegurarse de que las fibras estén completamente solidificadas antes del bobinado porque las fibras parcialmente fundidas pueden enredarse o romperse

### **Almacenamiento**

- Almacenar las bobinas en condiciones adecuadas para evitar daños, como la exposición a la humedad o a temperaturas extremas.
- Hay que asegurar que cada bobina esté etiquetada con información relevante (lote, fecha de producción, características de la fibra).

## **CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **4.1.DESARROLLO EXPERIMENTAL**

#### **4.1.1. Introducción**

Según el diagnóstico nacional de residuos presentado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) en colaboración del ministro Fernando Lopez, se expone que el país genera 4,226.48 toneladas de residuos por día, con una Disposición en rellenos sanitarios equivalente al 81 %, es decir, 3,001.00 toneladas por día y de los cuales aproximadamente el 25% es plástico. La crisis de la contaminación por plásticos se deriva principalmente de la economía lineal actual, es decir, producir, usar y desechar. Para reducir la contaminación por plásticos, se deben adoptar acciones que concuerden con la jerarquía de gestión de residuos y con el enfoque de economía circular. Tal es el caso del PET, que es el tipo de plástico más usado para envases en industrias como la de alimentos y bebidas. Las botellas de tereftalato de polietileno (PET) pueden ser recuperadas y recicladas, con el fin de obtener nuevos productos. Reciclar PET es reintegrar este polímero en un nuevo ciclo productivo como materia prima. Las telas fabricadas a partir de envases PET es una de las formas más convenientes de reciclar las botellas plásticas y prevenir la acumulación de las mismas

#### **4.1.2. Objetivos**

Llevar a cabo un ensayo práctico a nivel de laboratorio para evaluar la viabilidad técnica de transformar residuos plásticos de PET reciclado en fibra textil, mediante la replicación a pequeña escala de las etapas de procesamiento involucradas en dicha transformación.

##### **Objetivos específicos:**

- Simular a pequeña escala las etapas de transformación del PET reciclado, desde su preparación inicial hasta la obtención de fibra textil.
- Determinar los parámetros óptimos para una mayor conversión de plástico PET en fibra sintética con propiedades textiles deseables y que tengan buena calidad.
- Determinar la factibilidad del reciclaje de PET para la producción de fibra textil en condiciones controladas.

### 4.1.3. Procedimiento

#### Etapa 1 – CORTADO

##### Inspección visual.

- Comprobar que las botellas sean homogéneas en cuanto a material y color.
- Identificar y descartar las botellas con material diferente al PET.

##### Reducción de Tamaño de Muestra

- Usar tijeras de mano para cortar las botellas, separando el cuerpo de la botella del resto.
- Utilizar una regla graduada para medir y asegurar que los fragmentos sean uniformes.
- Cortar hasta obtener la cantidad de fragmentos de tamaño deseado.



*Figura 2. Colocación de muestras de PET en mesa de trabajo previo a la inspección visual*



*Figura 3. Plástico PET cortado y triturado para la experimentación*



*Figura 4. Separación de PET que contiene etiqueta o pegamento de la botella*



*Figura 5. Separación completa de plástico PET*

### **Pesaje y Almacenamiento de Muestras**

- Pesar 70g de material utilizando una balanza de precisión.
- Colocar los fragmentos en una bolsa plástica transparente.
- Etiquetar las bolsas con un plumón para su identificación.
- Guardar las bolsas en un lugar seco, con temperatura ambiente, hasta su uso en la etapa de fundición.

<b>Peso de muestra</b>	<b>Numero de muestras obtenidas</b>	<b>Etiqueta de muestras</b>
<b>70.0 g</b>	2	Línea 1 - L
<b>70.0 g</b>		Línea 1 - S
<b>70.0 g</b>	1	Línea 1 - M



*Figura 6. Medición de peso de PET de la línea 1 – L*



*Figura 7. Medición de peso de PET de la línea 1 – S*

## **Etapa 2 – LAVADO**

### **Preparación de agua de lavado**

- Llenar el recipiente plástico de 5 litros con agua de chorro hasta el 50% de su capacidad (aproximadamente 2.5 litros).
- Agregar 39g de detergente al agua.
- Usar un agitador para mezclar el detergente y el agua hasta obtener una solución homogénea, asegurando que el detergente esté completamente disuelto.
- Medir y registrar la temperatura inicial del agua.

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Valor medido</b>
<b>Volumen de agua</b>	Mililitros	2000
<b>Volumen de solución detergente</b>	Mililitros	250
<b>Temperatura ambiente</b>	°C	25.6

<b>Temperatura del agua</b>	°C	27
<b>Tiempo de mezcla</b>	Min	5
<b>Detalle de la solución</b>	homogénea	-
<b>Observaciones adicionales</b>	-	



**Figura 8.** *Peso de Detergente a utilizar en el lavado*



**Figura 9.** *250 ml de agua de chorro con 39 g de detergente en polvo para la solución*



**Figura 10.** *Solución de detergente*

## Lavado de PET cortado

- Agregar los 70.0 gramos de PET cortado al recipiente con la solución de detergente mezclada, asegurándose de cubrir completamente el material.
- Agitar manualmente durante 5 minutos para realizar la remoción de contaminantes adheridos al PET así como plásticos remanentes.
- Verificar visualmente la limpieza del material al final del tiempo, observando si se han eliminado los residuos indeseables.

Parámetro	Unidad de medida	Valor medido
Cantidad de PET	Gramos	70
Cantidad de solución utilizada	Mililitros	2000
Tiempo de agitación	Minutos	5
Temperatura del agua durante el lavado	°C	28



*Figura 11. Lavado y retiro de solidos que flotaban con un colador de malla fina*

## Filtración

- Después de los 5 minutos de lavado, colocar el colador de malla fina sobre otro recipiente de aproximadamente 5 litros (puede ser de mayor capacidad).
- Verter la solución para separar el PET triturado del agua sucia (Se recomienda utilizar un colador con una malla de 1 mm de apertura para retener el PET triturado, pero si el tamaño del PET triturado es más pequeño, se puede utilizar una malla de 0.5 mm).
- Desechar el agua residual en un sistema de eliminación adecuado para residuos líquidos o, si es posible, tratar el agua para reutilización en procesos futuros.

Parámetro	Unidad	Valor medido
Cantidad de agua filtrada	Mililitros	2000
Tiempo de filtración	Minutos	2
Cantidad de PET filtrado	Gramos	70



*Figura 12. Filtración de PET con la malla fina*



*Figura 13. Sólidos que se retiraron del lavado (plástico, etiquetas, PET con pegamento)*

### **Enjuague**

- Enjuagar bien el recipiente de lavado para eliminar cualquier residuo de detergente y llenarlo nuevamente con agua de chorro hasta aproximadamente el 50% de su capacidad (2.5 litros).

- Colocar el PET triturado en el recipiente con agua limpia. Agitar durante 5 minutos para asegurar que cualquier residuo de detergente o contaminante soluble sea eliminado.
- Filtrar nuevamente el PET triturado utilizando el colador para separarlo del agua de enjuague.
- Si al final del enjuague persisten residuos visibles en el PET, repetir el proceso de lavado y enjuague hasta que el PET se observe limpio y libre de contaminantes visibles.

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor de medido</b>
<b>Volumen de agua utilizado</b>	Litros	2000
<b>Tiempo de agitación</b>	Minutos	5
<b>Temperatura ambiente</b>	°C	27
<b>Temperatura del agua</b>	°C	28
<b>Numero de repeticiones de enjuague</b>	-	1

### **ETAPA 3 – SECADO**

#### **Eliminación de Agua Superficial**

- Extender el PET triturado sobre una hoja de papel absorbente (Servilletas, papel toalla kleenex), distribuyéndolo uniformemente en una capa delgada de aproximadamente 0.5cm de grosor. Esto maximiza la superficie de contacto y permite una mejor absorción del agua.
- Dejar el PET reposar sobre el papel absorbente y a temperatura ambiente durante aproximadamente 5 minutos para permitir que el papel absorba la mayor cantidad de agua superficial posible. Si el PET parece estar muy húmedo, puede extenderse el tiempo hasta 10 minutos.



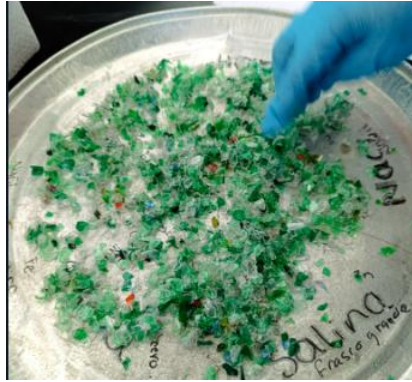
*Figura 14. Colocación de PET en toalla de absorción que a su vez esta sobre una bandeja de metal*



*Figura 15. Distribución uniforme de PET sobre la bandeja*



*Figura 16. Secado con otra toalla de absorción*



*Figura 17. Colocación de PET Lavado y semiseco en la bandeja*

### **Configuración del Horno**

- Calentar el horno a una temperatura de 70-80°C. Esta temperatura permitirá evaporar el agua sin riesgo de deformación o fusión del PET.
- Asegurarse de que la temperatura interna sea la adecuada antes de introducir el PET.

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Valor medido</b>
<b>Temperatura esperada</b>	°C	80
<b>Temperatura obtenida en el horno</b>	°C	80
<b>Tiempo para alcanzar la temperatura</b>	Minutos	40

### **Distribución del PET en la Bandeja**

- Transferir el PET triturado a una bandeja de acero inoxidable, asegurándose de que esté en una capa uniforme de aproximadamente 0.5cm de grosor.
- Evitar la formación de acumulaciones, ya que estas pueden dificultar un secado homogéneo.
- Colocar la bandeja en el horno, asegurándose de que el PET esté distribuido uniformemente.



*Figura 18. Medición de grosor de capa de la distribución de PET en la bandeja de metal*

### Proceso de Secado

- Mantener el PET en el horno a 70-80°C durante 30 minutos. Considerar que este tiempo puede variar según la cantidad de PET y la capacidad de secado del horno.
- A intervalos de 10 minutos, abrir ligeramente el horno (si es posible) para verificar si el secado es uniforme.
- Tomar una muestra de PET y con la ayuda de una balanza de secado, verificar la humedad de la muestra.

Parámetro	Unidad de medida	Valor medido
Tiempo de secado	Min	30
Temperatura del horno	°C	80
Peso final del PET luego del secado	Gramos	70
Humedad Final	%	0.25 - 0.32



*Figura 19. Introducción de bandejas con PET en horno a 80°C para su secado*



*Figura 20. Toma de muestra para terminar de retirar humedad en desecador*



*Figura 21. Muestras de PET en desecador*

## Enfriamiento y Verificación Final

- Una vez transcurrido el tiempo de secado, retirar la bandeja del horno y dejar que el PET se enfríe a en un desecador durante 10 minutos antes de manipularlo.



*Figura 22. Colocación de muestras en balanza de humedad*



*Figura 23. Resultados de la humedad en el PET*

Se cumple con el requisito de humedad menor al 1% y se garantiza que el PET se encuentra en condiciones óptimas para el proceso de fundición.

## Etapa 4 – FUNDICIÓN DEL PET

### Cargar el PET en el horno de fusión u olla de calentar

- Cargar 70.0g de PET cortado en una olla previamente calentada.
- Asegurarse de que el material esté distribuido de manera uniforme en el interior de la olla.

### Ajuste de temperatura

- Supervisar que se mantenga una temperatura constante durante todo el proceso de fundición (En caso de que se utilice una olla o hotplate se estará controlando la temperatura del PET fundido con un termómetro).
- Mientras el PET está fundiéndose se le harán agujeros a la lata que estará ajustada al taladro.
- Observar el estado del material para asegurarse de que todo el PET se funde de forma uniforme sin que queden partes sólidas.

Parámetro	Unidad de medida	Resultado
Temperatura de fundición del PET	°C	250
Tiempo de fundición	Minutos	5



*Figura 24. Fundición de plástico PET en olla*

## **Etapa 5 – FORMACIÓN DE HILO**

### **Formación de hilos a partir del PET fundido**

- Mantener la temperatura del PET fundido por encima de 200°C durante la formación de hilos para evitar solidificación prematura.
- Coloque cuidadosamente la tabla con los clavos dentro de la olla.
- Eleve la tabla gradualmente para generar los hilos, ajustándose hasta alcanzar la longitud deseada.
- Repita el procedimiento hasta agotar la totalidad del PET fundido.

### **Enfriamiento de las fibras extruidas**

- Dejar que se enfríe por sí sola a temperatura ambiente.

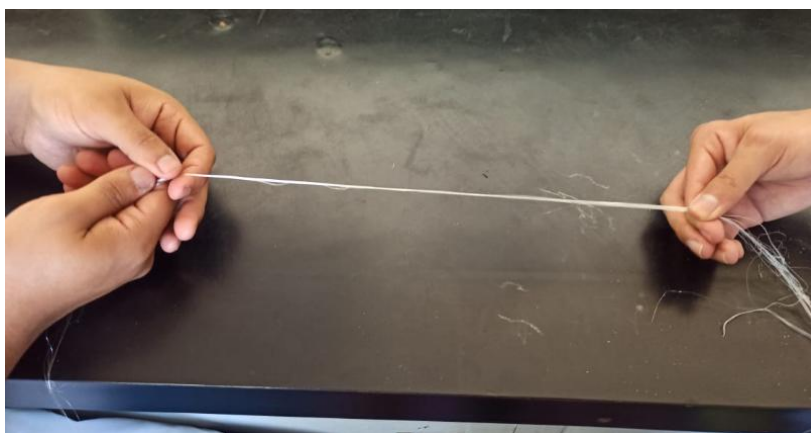
## **Etapa 6 – BOBINADO DE LAS FIBRAS**

### **Enfriamiento y bobinado de las Fibra**

- Asegurarse de que las fibras estén completamente solidificadas antes del bobinado porque las fibras parcialmente fundidas pueden enredarse o romperse

### **Almacenamiento**

- Almacenar las bobinas en condiciones adecuadas para evitar daños, como la exposición a la humedad o a temperaturas extremas.
- Hay que asegurar que cada bobina esté etiquetada con información relevante (lote, fecha de producción, características de la fibra).



*Figura 25. Bobinado de la fibra de PET.*

## 4.2.RESULTADOS OBTENIDOS

A través de este estudio, se obtuvieron resultados prometedores que, aunque limitados en términos de conversión, ofrecen una visión clara sobre las oportunidades de mejora y la importancia del proyecto en el contexto de la sostenibilidad industrial.

El experimento partió de 70 gramos de PET triturado como materia prima inicial, sometido a un proceso de fundición mediante un sistema básico que incluyó una olla metálica y un mechero Bunsen. Como producto final, se obtuvieron 10 gramos de fibra textil, los cuales equivalen a aproximadamente 10 metros de hilo.

$$\% \text{ de conversión} = \left( \frac{\text{Cantidad de fibra obtenida}}{\text{Cantidad de PET fundido}} \right) * 100$$

$$\% \text{ de conversión} = (10 \text{ g de fibra obtenida} / 70 \text{ g de PET fundido}) * 100$$

$$\% \text{ de conversión} = 14.28\%$$

Este resultado representa una conversión del 14.28% en masa con respecto al material inicial, mientras que el resto del PET, o sea 60 g que no se convirtieron equivalente a:

$$\% \text{ de desperdicio} = 100\% - \% \text{ de conversión}$$

$$\% \text{ de desperdicio} = 100\% - 14.28\%$$

$$\% \text{ de desperdicio} = 85.72\%$$

Este porcentaje de 85.72% nos indica la cantidad de PET que fue fundido pero que no se logró convertir en fibra utilizable para las pruebas por diversas causas como las condiciones de trabajo, uso del material o mala práctica al momento de realizar el proceso.

Aunque la proporción de conversión es baja, estos resultados tienen un valor significativo, ya que demuestran la capacidad de transformar residuos plásticos en fibras funcionales que presentan características físicas similares a las de las fibras convencionales utilizadas en la industria textil. Esto nos demuestra el potencial del PET reciclado como una alternativa viable para reducir la dependencia de materias primas vírgenes en la fabricación de textiles. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

*Tabla 11. Datos para análisis de resultados*

<b>Cantidad de trabajo de materia prima: 70 g</b>		
<b>Cantidad de fibra obtenida (g)</b>	<b>Porcentaje de conversión (%)</b>	<b>Desperdicio (g)</b>
<b>10</b>	14.28	60

Uno de los principales desafíos identificados durante el experimento fue el impacto de las condiciones operativas y ambientales sobre la eficiencia del proceso. El PET es un material que requiere temperaturas entre 200 °C y 250 °C para fundirse de manera efectiva. En este caso, se alcanzó una temperatura de 250 °C, lo que permitió la fundición del material. Sin embargo, al momento de extraer el PET fundido de la olla para formar los hilos, el cambio brusco de temperatura —de 250 °C a la temperatura ambiente de 26 °C— provocó que el material solidificado en un tiempo promedio de 3 segundos.

Este enfriamiento rápido limitó la posibilidad de estirar y bobinar los hilos de manera adecuada, lo que impactó directamente en la cantidad de fibra obtenida. El método utilizado, aunque efectivo para demostrar el principio del proceso, carecía de mecanismos para mantener la temperatura del material durante la manipulación, lo que resultó en un alto porcentaje de desperdicio.

A pesar de las limitaciones señaladas, el proyecto cumplió con el objetivo de demostrar la factibilidad técnica de reutilizar PET rechazado para la elaboración de fibras textiles. Los resultados obtenidos ofrecen una base valiosa para optimizar el proceso en futuras investigaciones, así como para escalar a nivel industrial.

En este sentido, el bajo porcentaje de conversión inicial no debe interpretarse como un fallo, sino como una oportunidad para identificar áreas clave de mejora. Entre estas, destaca la necesidad de implementar sistemas de control térmico más avanzados, que permitan evitar el choque térmico y mantener el PET fundido en condiciones óptimas para su manipulación. Asimismo, la incorporación de equipos especializados, como extrusoras y bobinadoras industriales, podría incrementar significativamente la eficiencia del proceso y reducir el desperdicio.

Durante el experimento se trabajó con varias muestras de PET una de ellas proporcionadas por la empresa y esta mostró un comportamiento anómalo al someterse

al proceso de fundición. Al alcanzar la temperatura de 250 °C, en lugar de fundirse de manera homogénea como lo hizo la muestra de PET puro, esta comenzó a carbonizarse, formando residuos sólidos oscuros y emitiendo un ligero olor a quemado. Este fenómeno no solo impidió que el material pudiera ser procesado como fibra textil, sino que también sugiere la presencia de materiales no compatibles en la muestra.

Una posible causa de este comportamiento es que la muestra contenía PET mezclado con otros polímeros de menor resistencia térmica, como polietileno de baja densidad o polipropileno, los cuales tienen puntos de fusión significativamente más bajos, generalmente entre 100 °C y 170 °C. Estas temperaturas más bajas habrían causado la degradación térmica de los polímeros no eran PET al alcanzar los 250 °C. Otra hipótesis es la presencia de contaminantes externos como residuos orgánicos, adhesivos o recubrimientos plásticos que no fueron eliminados adecuadamente durante el proceso de recolección o pretratamiento del PET, contribuyeron a la carbonización. Esto indica que la muestra no era completamente PET puro, sino una mezcla que no cumplía con las condiciones necesarias para su transformación de manera eficiente.

Este proyecto se alinea con las tres dimensiones de la sostenibilidad:

- **Ambiental:** Al aprovechar PET rechazado, se contribuye a la reducción de residuos plásticos y se fomenta una economía circular en la industria textil.
- **Económica:** La posibilidad de transformar residuos en insumos para la industria textil puede generar ahorros en costos de materia prima, además de abrir nuevas oportunidades de negocio.
- **Social:** La implementación de procesos sostenibles puede generar empleo en sectores relacionados con el reciclaje y la manufactura textil, además de sensibilizar a las comunidades sobre la importancia del reciclaje industrial.

Las observaciones realizadas durante el experimento no solo proporcionan información técnica valiosa, sino que también refuerzan la importancia de seguir invirtiendo en innovación tecnológica para abordar los desafíos del reciclaje industrial. Este esfuerzo no solo impacta positivamente en el medio ambiente, sino que también posiciona a la industria textil salvadoreña como un actor comprometido con la sostenibilidad.

#### 4.2.1. Resultados de Prueba ASTM D5035

Los resultados obtenidos en la ASTM D5035 deben interpretarse en el contexto de la aplicación para la que está destinada la fibra. Las fibras sintéticas como el PET reciclado suelen tener una resistencia superior y un alargamiento mayor que las fibras naturales. Para aplicaciones de alto rendimiento, se busca una alta resistencia a la tracción y un alargamiento moderado. Sin embargo, para aplicaciones como la ropa casual o productos más suaves, puede ser aceptable un alargamiento mayor.

El alargamiento se calcula como el porcentaje de aumento de la longitud original de la fibra al someterla a una carga o tensión, antes de que se rompa. La fórmula es la siguiente:

$$\text{Alargamiento} = \left( \frac{\text{Longitud final} - \text{Longitud inicial}}{\text{Longitud inicial}} \right) * 100$$

$$\text{Longitud inicial: } 10 \text{ cm} \quad \text{Longitud final: } 34 \text{ cm}$$

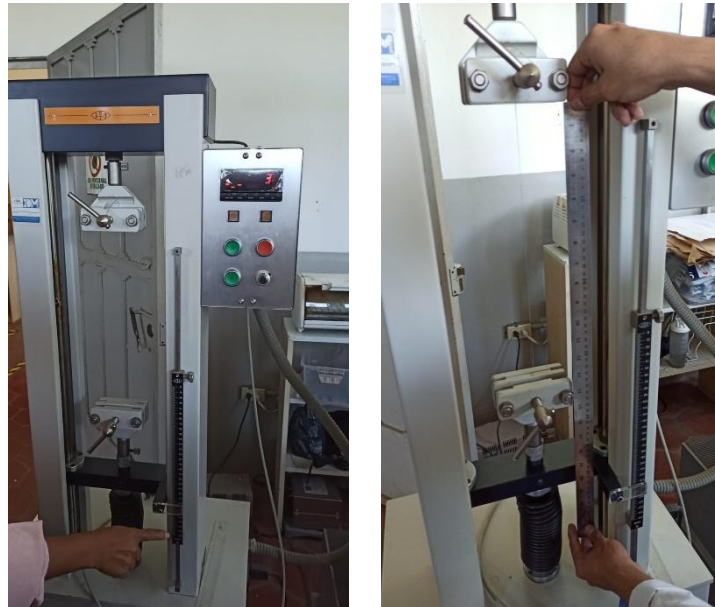
$$\text{Alargamiento} = \left( \frac{34 - 10}{10} \right) * 100 = 240\%$$

El alargamiento del 240% indica que la fibra tiene una capacidad de elongación significativa antes de la ruptura. Este comportamiento es característico de fibras con alta flexibilidad y elasticidad, como las fibras sintéticas, en particular el PET reciclado.

El alto alargamiento observado sugiere que la fibra obtenida posee una excelente capacidad para adaptarse a tensiones y deformaciones sin romperse, lo que la hace particularmente adecuada para su uso en la industria textil, especialmente en la fabricación de ropa. Este tipo de fibra es ideal para productos que requieren flexibilidad, comodidad y adaptabilidad, como prendas de uso diario, ropa deportiva, ropa interior o incluso ropa de trabajo que exigen un grado de estiramiento y comodidad al usuario. La elasticidad inherente a la fibra permite que las prendas se adapten mejor al cuerpo, lo que incrementa su comodidad y ajuste en el usuario, al tiempo que mejora la durabilidad al resistir el desgaste asociado con la elongación y los movimientos repetitivos.

Además, el alargamiento significativo de la fibra proporciona un comportamiento dinámico bajo tensión, lo que permite que las prendas fabricadas con ella tengan la capacidad de recuperar su forma después de ser estiradas, manteniendo así su estructura y forma a lo largo del tiempo. Esto resulta en un mayor rendimiento de las prendas, lo que a su vez contribuye a su larga vida útil, lo cual es particularmente importante en

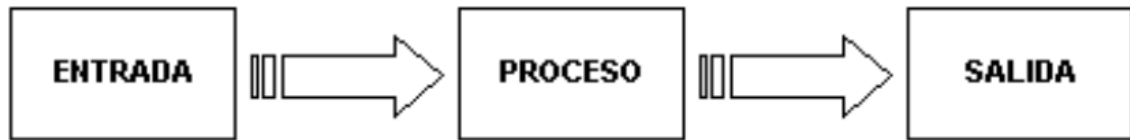
productos destinados a ropa deportiva o ropa de alto rendimiento donde la elasticidad y la recuperación de forma son requisitos clave. Sin embargo, a pesar de este alargamiento favorable, la resistencia a la tracción es otro factor crucial que debe ser evaluado con más precisión para determinar la capacidad de la fibra para soportar cargas sin romperse.



*Figura 24. Resultados de prueba ASTM 5035 para la muestra textil obtenida*

#### **4.2.2. Análisis económico**

En la prueba realizada, se utilizó un total de 70 gramos de materia prima proveniente de PET rechazado, obteniendo como resultado 10 gramos de fibra. Esto representa un rendimiento del 14.28%, indicando que 85.72% del material no se transformó en producto final y, por lo tanto, constituye un desperdicio. Mediante un análisis de caja negra se simplifica la representación del proceso de producción al observar únicamente sus entradas y salidas, sin considerar los detalles internos del procedimiento, lo que permite identificar los factores clave del procedimiento.



- |                         |                       |  |
|-------------------------|-----------------------|--|
| - 70g de PET rechazado  | - Lavado              | - 10g de fibra (14.28%)                          |
| - Consumo energético    | - Secado              | - Desperdicio (60g de PET equivalente al 85.72%) |
| - Consumo de agua       | - Fundido             | - Agua residual                                  |
| - Mano de obra          | - Extrusión casera    | - Desechos                                       |
| - Materiales auxiliares | - Procesos auxiliares |  |

En este modelo, se evidencia que solo una fracción del material procesado (14,28%) se transforma en fibra útil, mientras que el resto (60 gramos) corresponde a pérdidas. Este análisis plantea oportunidades de mejora, especialmente enfocadas en la reducción de desperdicios y el reaprovechamiento del material no convertido.

Dado que no se cuenta con datos reales, se realizará un análisis con valores supuestos para ilustrar el proceso de manera clara. Este análisis incluye costos de materia prima, energía, mano de obra y otros recursos utilizados en el laboratorio piloto.

- Costo por kilogramo de PET rechazado: \$0.50 (valor referencial del PET reciclado).
- Costo energético (electricidad): \$0.20 por prueba experimental.
- Costo de mano de obra: \$4.00 por prueba (considerando un tiempo de trabajo de 4 horas con tarifa de \$1.00/hora).
- Costo de equipo/insumos del laboratorio: \$1.00 por desgaste de herramientas y otros materiales.

Suponiendo que el precio del poliéster comercial (hilo de poliéster industrial) en el mercado es \$2.00 por kilogramo, el costo unitario del poliéster sería \$0.002/gramo.

Sumando los costos involucrados tenemos:

Materia prima =	\$0.50/kilo (\$0.035 por 70g)
Consumo energético =	\$0.20
Mano de obra =	\$4.00
Suministros de laboratorio =	\$1.00
<b>Total de costos =</b>	<b>\$5.235</b>

Calculamos ahora el costo por cada gramo de fibra obtenida

$$\text{Costo unitario} = \frac{\text{Costo total de producción}}{\text{cantidad de gramos obtenida}}$$

$$\text{Costo unitario} = \frac{5.235 \text{ dolares}}{10 \text{ gramos de fibra}}$$

$$\text{Costo Unitario} = \$0.52/\text{gramo}$$

Por lo tanto, el costo de producción es de aproximadamente \$0.52 por gramo de hilo producido.

Para evaluar la viabilidad económica de la fibra obtenida a partir de PET reciclado, es necesario establecer una comparación directa con el poliéster comercial, tomando en cuenta factores como costos de producción, calidad, impacto ambiental y escala.

*Tabla 12. Comparativa económica de fibras*

<b>Criterio a evaluar</b>	<b>Fibra comercial</b>	<b>Fibra a partir de PET reciclado</b>
<b>Costo (dólar/gramo)</b>	\$0.002/gramo	\$0.52/gramo
<b>Calidad del producto</b>	Alta y estandarizada	Alta, aunque variable. Dependiente del proceso de producción
<b>Impacto ambiental</b>	Alto, puesto que utiliza material 100% virgen	Bajo, reduce la cantidad de residuos plásticos que contribuyen a la contaminación del medio ambiente

<b>Criterio a evaluar</b>	<b>Fibra comercial</b>	<b>Fibra a partir de PET reciclado</b>
<b>Escala</b>	Industrial	Laboratorio (requiere optimización)
<b>Valor agregado</b>	Producto estándar	Sostenible, reciclable y ecológico

Esto significa que el poliéster comercial tiene un costo unitario significativamente menor (\$0.002/gramo) en comparación con el hilo de PET reciclado obtenido en el laboratorio piloto (\$0.52/gramo). A nivel de costos, la fibra de PET reciclada presenta actualmente un valor unitario más elevado que el poliéster comercial. Esto se debe principalmente a la ineficiencia del proceso (bajo rendimiento) y los costos asociados a una escala de producción limitada. Sin embargo, el producto tiene un alto valor agregado en términos de sostenibilidad ambiental, lo que puede ser un factor diferenciador clave en el mercado.

#### **Estrategias para mejorar la viabilidad económica**

- Aumentar la eficiencia del proceso para elevar el porcentaje de conversión del material, reduciendo las pérdidas (actualmente del 85,72%). Esto puede lograrse a través de ajustes en los parámetros de fundido y extrusión.
- Implementar un sistema que permita reaprovechar los residuos (60 g de PET no convertido) en procesos subsecuentes, minimizando desperdicios y costos de materia prima.
- Posicionar la fibra de PET reciclado como un producto sostenible en mercados especializados que priorizan la economía circular y la reducción del impacto ambiental.
- El análisis económico del proceso evidencia que, si bien actualmente el costo unitario de producción de la fibra reciclada es superior al poliéster comercial, el producto tiene un alto potencial debido a su valor sostenible y su impacto ambiental reducido. A través de la optimización de procesos, reducción de costos y escala, es posible mejorar significativamente la viabilidad económica y competir con el poliéster tradicional en el mercado.

## CONCLUSIONES

- La fibra obtenida a partir de PET reciclado proveniente de una línea de rechazo de una empresa de El Salvador representa un avance significativo hacia la adopción de materiales sostenibles dentro de la industria textil. Los resultados obtenidos a nivel de laboratorio demuestran que este tipo de fibra puede cumplir con los estándares necesarios para diversas aplicaciones textiles, especialmente en sectores que valoran la elasticidad y la flexibilidad, como la ropa deportiva y/o casual, puesto que presenta propiedades similares al poliéster.
- Se identificaron varios factores ambientales e instrumentales que influyen directamente en la calidad del producto obtenido. Entre ellos, la humedad ambiental durante el secado, la estabilidad de la temperatura en el proceso de fusión y la precisión de los instrumentos utilizados fueron elementos determinantes para el éxito del proyecto.
- La caracterización del material desempeña un papel muy importante en la producción de fibra textil a partir de PET reciclado, ya que verificar la pureza del material asegura que este reaccione adecuadamente a las temperaturas de fundición específicas de dicho polímero, por lo que, en caso de utilizar materiales contaminados o con mezclas de otros compuestos, las propiedades térmicas pueden alterarse considerablemente, incrementando así el riesgo de carbonización y afectando tanto la calidad del producto final como la eficiencia del proceso.
- Las fibras mostraron una resistencia considerable y un alargamiento del 240% respecto a su longitud inicial. Este comportamiento las hace aptas para aplicaciones textiles, especialmente en productos donde la flexibilidad y la durabilidad son esenciales, como en prendas de vestir cotidianas. Aunque estas fibras no alcanzaron las propiedades de las fibras de poliéster puro, demostraron ser lo suficientemente robustas para competir en el mercado, particularmente en segmentos que valoran la sostenibilidad y el uso de materiales reciclados.
- El porcentaje de conversión de plástico a fibra textil resultó de un 14.28% con la metodología propuesta. Aunque se considera al PET como material factible para la producción de fibra textil, los bajos niveles de conversión limitan la viabilidad a gran escala.
- El presente estudio sobre la obtención de fibra textil a partir de PET rechazado demuestra el potencial de este material como una alternativa sostenible dentro de la

industria textil. A través del análisis experimental, se identificó que el proceso actual presenta un rendimiento del 14.28%, lo que indica una conversión limitada de materia prima en fibra útil y una pérdida del 85.72%. Este bajo rendimiento impacta directamente en la viabilidad económica del proyecto, ya que el costo unitario de producción (\$0.52/gramo) es significativamente mayor al del poliéster comercial (\$0.002/gramo). Si bien los resultados actuales evidencian desafíos en términos de eficiencia y costos, la investigación permite identificar áreas clave de mejora. Entre ellas, la optimización de los parámetros de producción, la reducción de desperdicios y el reaprovechamiento del material no transformado son aspectos fundamentales para incrementar la rentabilidad del proceso. Además, el valor agregado de esta fibra en términos de sostenibilidad ambiental representa una oportunidad para su posicionamiento en mercados especializados que priorizan el uso de materiales reciclados. Aunque el proceso aún no es económicamente competitivo frente al poliéster tradicional, su desarrollo y perfeccionamiento pueden abrir nuevas oportunidades en la industria textil sostenible. La optimización del proceso, junto con una posible escalabilidad industrial, podría contribuir a la reducción del impacto ambiental generado por los residuos plásticos, promoviendo un modelo de producción más responsable y alineado con los principios de la economía circular.

## **RECOMENDACIONES**

- Implementar un sistema más riguroso de clasificación y limpieza del PET rechazado para garantizar una materia prima de alta pureza, reduciendo la presencia de contaminantes que afecten el proceso y los resultados finales.
- Se recomienda realizar estudios complementarios de este proceso a escala industrial para evaluar la viabilidad económica y determinar de manera certera la sostenibilidad económica y el impacto social que podría tener su implementación.
- Llevar a cabo una investigación detallada sobre el proceso de enfriamiento en la formación de hilos, con el propósito de comprender y analizar cómo las variaciones en esta etapa afectan las propiedades mecánicas de las fibras obtenidas, ampliando el estudio de las condiciones óptimas del proceso.
- Adoptar medidas que optimicen el uso eficiente del recurso hídrico en la etapa del proceso de lavado. El proceso de lavado de muestras genera aguas residuales que pueden ser incluida en un estudio del impacto ambiental del proceso, afectando la sostenibilidad del proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

### Artículos científicos y revisiones

- Al-Azawi, A. A. A. (2018). Recycling of polyethylene terephthalate (PET) bottles: A review. *Journal of Materials Science*. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2114-0>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Joseph, T. M., Azat, S., Ahmadi, Z., Jazani, O. M., Esmaeili, A., Kianfar, E., Haponiuk, J., & Thomas, S. (2024). Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100673. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100673>
- Khan, M. M. R. A. R. R. A. Z., Rahman, M. M., & Rahman, M. M. (2020). Textile recycling: A systematic review. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104906. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104906>
- Tripathi, M., Sharma, M., Bala, S., Thakur, V. K., Singh, A., Dashora, K., Hart, P., & Gupta, V. K. (2024). Recent technologies for transforming textile waste into value-added products: A review. *Current Research in Biotechnology*, 7, 100225. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2024.100225>
- Wang, Y., & Xu, H. (2018). Recycling of PET and other thermoplastic polymers. *Polymer International*, 67(2), 235-244. <https://doi.org/10.1002/pi.5515>
- Zhang, X., Zhang, L., & Yu, J. (2020). Mechanical properties and applications of recycled PET fibers in textiles. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123285. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123285>

### Libros y capítulos de libros

- Freeman, R. E., et al. (2021). *Corporate social responsibility and sustainability: A comprehensive approach*.

- Smith, J. (2021). The role of recycling in sustainable textile production. *Textile Outlook International*, 205, 28-31.
- Wang, H. L. (2016). *Sustainable fibres and textiles*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04593-3>

### Normas y estándares

- ASTM International. (n.d.). *ASTM D5034 - Standard Test Method for Breaking Strength and Elongation of Textile Fabrics*. <https://www.astm.org/Standards/D5034.htm>
- ASTM International. (n.d.). *ASTM D4157 - Standard Test Method for Abrasion Resistance of Textile Fabrics (Oscillatory Motion)*. <https://www.astm.org/Standards/D4157.htm>
- ASTM International. (n.d.). *ASTM D5035 - Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Grab Test)*. <https://www.astm.org/Standards/D5035.htm>
- International Organization for Standardization. (2001). *ISO 105-X12:2001 - Textiles — Tests for Colour Fastness — Part X12: Colour Fastness to Rubbing*. <https://www.iso.org/standard/25432.html>
- International Organization for Standardization. (2008). *ISO 5077 - Textiles - Determination of Dimensional Change in Washing and Drying*. <https://www.iso.org/standard/40100.html>
- International Organization for Standardization. (2010). *ISO 105-C06:2010 - Textiles — Tests for Colour Fastness — Part C06: Colour Fastness to Domestic and Commercial Washing*. <https://www.iso.org/standard/52856.html>
- International Organization for Standardization. (2014). *ISO 1833 - Textiles - Quantitative Chemical Analysis*. <https://www.iso.org/standard/64606.html>
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001:2015 - Quality Management Systems — Requirements*. <https://www.iso.org/iso-9001-quality-management.html>

- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14001:2015 - Environmental Management Systems — Requirements with Guidance for Use*. <https://www.iso.org/iso-14001-environmental-management.html>

### Documentos gubernamentales y legales

- Asamblea Legislativa de la República de El Salvador. (2022). *Propuesta de Ley para la Prevención de la Contaminación por Plásticos de un Solo Uso*.
- Ley de Medio Ambiente de El Salvador. (1998). *Diario Oficial República de El Salvador, Tomo No. 339, Número 79*, San Salvador, 4 de mayo de 1998.
- Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe* (LC/G. 2681-P/Rev. 3), Santiago.
- United Nations Environment Programme. (2020). *Single-Use Plastics: A Roadmap for Sustainability*. <https://www.unep.org/resources/report/single-use-plastics-roadmap-sustainability>

### Páginas web y artículos en línea

- Ecologistas en Acción. (n.d.). *Reciclar PET*. Recuperado de <https://www.ecologistasenaccion.org/reciclar-pet/>
- European Commission. (2022). *Plásticos en la economía circular*. Recuperado de [https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index\\_es.htm](https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_es.htm)
- Fundación Biodiversidad. (2023). *El reciclaje del PET: una oportunidad para la economía circular*. Recuperado de <https://www.fundacion-biodiversidad.es/noticias/reciclaje-pet-oportunidad-economia-circular>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). *Guía de sostenibilidad y reciclaje de plásticos*. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/economia-verde/guia-sostenibilidad-reciclaje-plasticos.aspx>
- Performance testing of textiles. (n.d.). *Google Books*. Recuperado de <https://books.google.com.sv/books?id=oABKCGAAQBAJ>