



Estudio de vigilancia tecnológica para la exploración del uso de fibras PET en la industria textil

María Fernanda Tique Muñoz

**Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Industrial**
Ibagué, 2022



Estudio de vigilancia tecnológica para la exploración del uso de fibras PET en la industria textil.

María Fernanda Tique Muñoz

Trabajo de grado que se presenta como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniera Industrial

Directores (as):

Ing Natalia Andrea Salazar Camacho

Profesora Universidad de Ibagué

Ing Luz Adriana Sánchez Echeverri

Profesora Universidad de Ibagué

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Industrial

Ibagué, 2022





Agradecimientos

Primeramente, doy gracias a Dios por permitirme vivir esta etapa universitaria y encaminarme por un camino lleno de retos que me han hecho crecer como nunca imaginé. Agradezco a mi madre Gloria Muñoz, a mi padre Fernando Tique y a mi hermano Juan David Morales por su apoyo incondicional durante todos estos años, el cual me ha llenado de fuerza y me ha servido como guía para tomar todo tipo de decisiones.

Ahora, que estoy culminando esta etapa con la realización de este trabajo de grado de la mano de la Ingeniera Natalia Andrea Salazar y la Ingeniera Luz Adriana Sánchez, les agradezco a ellas por su disposición, confianza e imprescindible apoyo a lo largo de estos últimos meses.

Por último, agradezco a cada una de las personas que fueron partícipes en mi formación desde niña incluyendo familia, maestros y amigos; ya que aportaron al desarrollo de mis habilidades sociales, académicas y personales con las cuales no hubiera sido posible llegar a este punto.



Resumen

Dado el gran impacto ambiental generado por la industria textil, se han propuesto diferentes estrategias tanto a nivel comercial como gubernamental para mitigar dicho problema. Dentro de estas propuestas, el reciclaje se encuentra como pilar fundamental y la transformación de botellas PET en fibras textiles es actualmente una de las alternativas más llamativas en el mercado; sin embargo, uno de los principales inconvenientes es la afectación de algunas de sus propiedades. Partiendo de este punto, el presente trabajo de grado tiene como principal objetivo explorar el uso de fibras PET en la industria textil mediante un estudio de vigilancia tecnológica en donde inicialmente se describe la obtención de fibras PET, luego se describen y caracterizan tratamientos para mejorar sus propiedades y por último se identifican aplicaciones potenciales. Los resultados de este proyecto sirven al mercado y grupos de interés, como base para la toma de decisiones relacionadas con el uso de fibras PET en la industria textil.

Palabras clave: Reciclaje, Fibra, PET, Tratamiento, Propiedades.

Abstract

Given the environmental issues generated by the textile industry, different actions have been proposed both at the commercial and governmental levels to mitigate this problem. Within these proposals, recycling is a fundamental pillar and the transformation of PET bottles into textile fibers is currently one of the most striking alternatives on the market; however, one of the main drawbacks is the affectation of some of its properties. Starting from this point, the main objective of this work is to explore the use of PET fibers in the textile industry through a technological surveillance study where the manufacturing of PET fibers is described; then, different treatments to improve fibers properties are described and characterized and finally potential applications are identified. The results of this project serve the market and interest groups as a basis for decision-making related to the use of PET fibers in the textile industry.

Keywords: Recycling, Fiber, PET, Treatment, Properties.



Tabla de contenido

Introducción.....	1
Capítulo 1: Problema de estudio, justificación y objetivos	4
1.1 Problema y justificación del estudio.....	4
1.2 Objetivos	6
a. Objetivo general:.....	6
b. Objetivos específicos:	6
Capítulo 2: Aspectos metodológicos	8
2.1 Metodología	8
a. Etapa 1: Diagnóstico y priorización	8
b. Etapa 2: Búsqueda y captura de información.....	9
c. Etapa 3: Análisis de información.....	9
d. Etapa 4: Valorización de información relevante	10
2.2 Fuentes de información y herramientas de consulta.....	10
2.3 Actividades.....	11
Capítulo 3: Marco de referencia para el estudio	12
3.1 Marco conceptual y teórico:.....	12
a. Conceptos base.....	12
3.2 Industria textil y su impacto ambiental	14
3.3 Obtención de PET	17
a. La síntesis del monómero	18
b. Reacción de policondensación del monómero	19
3.4 Métodos de reciclaje PET.....	22
a. Reciclaje mecánico.....	24
b. Reciclaje químico.....	29
c. Reciclaje térmico	33
Capítulo 4: Recopilación de tratamientos ejercidos sobre la fibra PET para utilización textil	35
4.1 Descripción de tratamientos	35
4.2 Tabla de caracterización	54
Conclusiones, recomendaciones y limitaciones del estudio	57
5.1 Conclusiones.....	57
5.2 Limitaciones y recomendaciones.....	58
Referencias bibliográficas	59



Lista de figuras

Figura 1: Etapas del estudio de vigilancia tecnológica.....	8
Figura 2: Estructura química del PET	12
Figura 3: Diagrama de flujos simplificado de la cadena de suministro textil	15
Figura 4: Reacción de transesterificación para monómero BHET	18
Figura 5: Reacción de esterificación por monómero BHET.....	19
Figura 6: Proceso de la policondensación en estado fundido (MMP).....	20
Figura 7: Proceso de la policondensación en estado sólido (SSP)	22
Figura 8: Clasificación de rutas de reúso y reciclaje textil	23
Figura 9: Diagrama de operaciones del proceso de producción de fibra corta de poliéster a partir de botellas PET	28
Figura 10: Diagrama de bloques de la metanólisis.	30
Figura 11: Diagrama de bloques de la Hidrólisis Ácida.....	31
Figura 12: Despolimerización del PET por glicólisis con etilenglicol	32
Figura 13: Proceso de preparación del PET-G/Ag°	36
Figura 14: Diagrama esquemático de la preparación de Cu ₂ O@TM.....	37
Figura 15: Ilustración esquemática de la estrategia para la preparación de tejido TSP-PET superhidrófobo.....	38
Figura 16: Proceso de preparación de DY-PET.....	40
Figura 17: Fibra FR-PET y sus productos derivados	40
Figura 18: Condiciones aplicadas y paso a paso de la síntesis de rGO/SnO ₂ en el tejido PET.....	43
Figura 19: Ilustración de la fabricación de textiles de PET superhidrófobos con propiedades de protección UV	45
Figura 20: Ilustración esquemática del procedimiento de síntesis de las nanoláminas Cu ₂ O@OZrP.....	46
Figura 21. Proceso de fabricación de la película CuxS jerárquica sobre el tejido aislante PET	48
Figura 22: Rutas de síntesis de DPHP	49
Figura 23: Esquema del proceso de preparación de los tejidos conductores compuestos multicapa de Ni/PPy/PET.	50
Figura 24: Ilustración esquemática de la preparación de tejido PET ignífugo	52
Figura 25: Proceso de preparación de sol compuesto de SiO ₂ y tejido de poliéster superhidrófobo	53



Lista de tablas

Tabla 1: Objetivos y actividades del proyecto	11
Tabla 2: Características y propiedades del PET	13
Tabla 3: Categorización de fibras textiles	16
Tabla 4: Características del PET y del rPET	28
Tabla 5: Consolidación de características de principales métodos de reciclaje químico de botellas PET	33
Tabla 6: Contenido energético del PET comparado con otros combustibles	34
Tabla 7: Comparativo de diferentes tipos de reciclaje.....	34
Tabla 8: Tabla de caracterización.....	54



Introducción

La industria textil es ampliamente conocida por el gran impacto ambiental que genera no sólo a lo largo de toda la cadena de producción sino también en los modelos de mercadeo utilizados. En cuanto a la cadena productiva, se estima que tan sólo los procesos de teñido y acabado son responsables de alrededor del 20% de la contaminación de agua limpia en el mundo. Esta industria también es responsable del 10% de las emisiones globales de carbono; además de una recuperación de residuos casi inexistente, en la que se estima que menos del 1% de la ropa se recicla (Residuos profesional, 2021).

A raíz de este listado de responsabilidades ambientales y sociales con las que lidia la industria textil, diferentes propuestas y estrategias se han presentado tanto a nivel comercial como gubernamental; como por ejemplo el Pacto Verde Europeo que propone un modelo de economía circular en la industria textil en el que se encuentra el reciclaje como pilar fundamental (Unión Sindical Obrera, 2020).

Igualmente, una de las industrias actuales que genera más impacto ambiental en el mundo es la industria del plástico. Tan solo refiriéndose a la producción de botellas PET, las materias primas utilizadas ya hacen de éste un proceso muy contaminante: 100 ml de petróleo son necesarios para fabricar 1 botella PET. Ahora bien, avanzando a los últimos eslabones de su ciclo de vida, la disposición y eliminación de botellas PET supone grandes retos.

- Si se incinera el plástico, se producen vapores tóxicos y así contaminan el medio ambiente.
- Si va a los vertederos, su largo tiempo de degradación (aproximadamente 500 años) hacen de este método un problema.
- Si se recicla, un bajo porcentaje se reprocesa para ser utilizado de nuevo en envases alimentarios y, por el contrario, la mayoría se recicla en productos de menor calidad (EcoNoticias, 2018).

El reciclaje de botellas PET para la fabricación de fibras textiles resulta ser un proceso muy atractivo, ya que representa una forma de mitigar el impacto ambiental generado por ambas industrias. Por ejemplo, la empresa Taiwanesa “Super Textile Corporation” fabrica mantas cuyas dimensiones son de 230 x 180 cm, para las cuales son requeridas 78 botellas PET. También la marca española Ecoalf 1.0, la cual recicla 83 botellas PET en el proceso de fabricación de mochilas en su referencia más pequeña (AvatarEnergia, s.f.)



Sin embargo, uno de los inconvenientes de este proceso, es la pérdida de cierto grado de las propiedades del PET ya sea debido a su experiencia térmica; al inicio de la degradación que puede sufrir durante su uso o a la presencia de sustancias que se encuentren en el entorno. Esta atenuación de las propiedades hace que los plásticos reciclados mecánicamente deban emplearse en la fabricación de productos diferentes a los de su uso inicial (Quintero, 2016).

Es por esto que la aplicación de tratamientos químicos, térmicos o mecánicos a la fibra PET reciclada son de gran importancia, pues tienen como principal propósito aportar diferentes propiedades a la fibra como: bloqueo UV, propiedades hidrófilas, propiedades antibacterianas, desempeño ignífugo, electro-conductividad, entre otras. Estas propiedades adquiridas, hacen de la fibra PET un producto mucho más atractivo para el mercado y pueden convertirla en un material que compite incluso, con la fibra PET virgen.

En una búsqueda por explorar las estrategias que buscan dar frente al impacto ambiental de la industria textil y plástica, se presenta esta investigación que se basa en la exploración del uso de fibras PET en la industria textil. Así mismo, se exploran diferentes tratamientos utilizados para aportar propiedades a la fibra PET proporcionando como producto una tabla de caracterización que contiene la información más relevante de cada uno de ellos.

Este proyecto se llevará a cabo mediante la metodología de Estudio de Vigilancia Tecnológica. Esta metodología se seleccionó dado que, es una forma sistemática de captación y análisis de información científico-tecnológica que sirve de apoyo en los procesos de toma de decisiones. Es decir que, mediante la detección de fuentes de información esenciales, la extracción de información relevante sobre tendencias y novedades tecnológicas, entre otros aspectos, se busca brindar a un decisor la posibilidad de trazar planes y formular estrategias tecnológicas, minimizando la incertidumbre (Evalue, s.f.). Esto concuerda con el propósito del proyecto, el cual es extraer información relevante sobre novedades y tendencias tecnológicas sobre tratamientos aplicados a fibras PET, analizarla, difundirla y comunicarla, con el fin de que el mercado y grupos de interés, puedan tomar las decisiones más adecuadas para sus necesidades y con un menor riesgo.

El presente trabajo se divide en 6 capítulos. El Capítulo 1 corresponde al problema de estudio, su justificación y objetivos aprobados. Luego, el capítulo 2, menciona los aspectos metodológicos de las diferentes etapas, fuentes de información y herramientas de consulta utilizadas. Después, en el capítulo 3, se encuentra el marco de referencia para el estudio, el cual incluye una serie de conceptos base y se adentra a todo lo relacionado con el PET: qué es, cómo se obtiene y métodos de reciclaje. Por otro lado, en el capítulo 4, se presenta una recopilación de los tratamientos ejercidos sobre la fibra PET para utilización textil. Estos, se describen a través de unas variables establecidas las cuales se resumen y evidencian en una tabla de caracterización. El capítulo 5, relaciona los tratamientos encontrados, con sus posibles aplicaciones. Es el capítulo en el que se materializan las



propiedades adquiridas por la fibra PET y se visualiza su aplicación en la industria. Por último, se cierra el documento con el sexto capítulo, en el que se presentan las conclusiones y recomendaciones finales.

Capítulo 1: Problema de estudio, justificación y objetivos

Este capítulo tiene como propósito, presentar el planteamiento problema del estudio y su justificación. Esto, a través de la contextualización de la industria textil en los últimos años, mencionando los retos ambientales a los que se enfrenta y el posible panorama futuro. Por último, se mencionan los objetivos del estudio.

1.1 Problema y justificación del estudio

La industria textil es uno de los pilares económicos del siglo XXI con una cifra de 300 millones de personas empleadas en el mundo para el 2017 (Moda Es, 2018). La deslocalización de fábricas a países en vía de desarrollo especialmente en países del sudeste asiático gracias a sus bajos costes de mano de obra y de fabricación, permiten que en todo el mundo sea muy fácil acceder a diferentes prendas de vestir y a un muy bajo costo (Mohorte, 2020).

Las exportaciones mundiales de textiles y prendas de vestir crecieron un 5% del 2008 al 2018, alcanzando los US\$747,567 mil millones en 2016, de acuerdo a cifras de la Organización Mundial del Comercio, donde tan sólo China concentra el 35% de las ventas mundiales de prendas de vestir con un valor de aproximadamente US\$150 mil millones, lo cual permite dimensionar la magnitud e influencia de esta industria a nivel mundial (Promperú, 2018).

Por otro lado, a nivel nacional la industria textil representa más del 5% de las exportaciones, lo que la convierte en el sector más importante de productos no tradicionales exportados al exterior (Procolombia, s.f.). No obstante, se estima que del 2005 al 2017 se perdieron más de 600 mil empleos debido al exponencial crecimiento de las importaciones de los países asiáticos (El Nuevo Siglo, 2019).

El gran crecimiento de la industria textil en los últimos años, que en gran medida se debe a una cultura de consumo en la que se priorizan las prendas baratas y de escasa duración sobre las más duraderas, ha traído consigo una serie de problemas sociales y medioambientales que sitúan a la industria textil en una posición con problemas de reputación tanto ambiental como social, considerándose la industria con la segunda huella medioambiental más alta entre todas las actividades del planeta (Mohorte, 2020).

En lo que se refiere al impacto ambiental, nos encontramos con que la industria de la moda contribuye al 10% de los gases de efecto invernadero y genera el 20% de las aguas residuales del mundo, según Naciones Unidas, lo cual no parece nada extraño al tener en cuenta que el número de residuos textiles producidos desde 1960 hasta 2015 aumentó



811% (Sierra, 2020). Adicionalmente, la fuente de sus materias primas es otra de las principales causas de su gran impacto ambiental ya que sólo el 2% provienen del reciclaje y el 98% restante de fuentes vírgenes (Generación Vitnik, 2018).

Esta problemática ambiental también se ve reflejada en nuestro país donde sólo el 33% de las empresas registradas en el sector textil elaboran informes de sostenibilidad, estando esto ligado a su responsabilidad medioambiental. Además, según la ANDI, sólo el 0,4% de los textiles son aprovechados y comercializados nuevamente (Montero, 2021).

Ninguno de estos hechos es indiferente a la realidad económica de la industria; de hecho, según un estudio realizado por la fundación Ellen McArthur, cada año se pierden más de US\$500 mil millones en el mundo debido a la falta de reciclaje y la ropa que se arroja a vertederos sin ser vendida. (Generación Vitnik, 2018).

En cuanto al factor social, esta industria también es señalada por desentenderse de las condiciones de vida de sus empleados ya que la mayoría de ellos no trabaja directamente para las grandes marcas, sino para empresas subcontratadas principalmente en países como China, Camboya, Bangladesh, India, Marruecos, Turquía, Filipinas, Egipto o Sri Lanka, lo cual limita la transparencia para conocer los proveedores iniciales de la cadena. Una de las mayores catástrofes fue la ocurrida en el 2013 por el derrumbe del edificio Rana Plaza en Bangladesh, un país de gran atractivo para la industria por sus bajos salarios donde se cobró la vida de 1.127 personas. El edificio, utilizado para empaquetar ropa de grandes firmas como Primark y Benetton, se encontraba en pésimas condiciones estructurales (Linde, 2014).

Debido a esto, hoy en día diferentes organizaciones internacionales han trabajado en diferentes estrategias para generar un cambio de hábitos en la industria textil, algunas de ellas realizadas por la ONU como la creación de la “Alianza de las Naciones Unidas sobre la Moda Sostenible”, la cual tiene como principal objetivo presionar a gobiernos y empresas para reconducir el modelo (Sierra, 2020); o la configuración de la Carta de la Industria de la Moda para la Acción Climática en 2018, donde se establecen compromisos con la intención de modificar hábitos de la industria relacionados con el abuso en la utilización de recursos (Salinas, 2021). La Unión Europea también se ha hecho presente con implementación de estrategias; por ejemplo, mediante EURATEX (the european apparel and textile confederation) con la creación de centros de reciclaje textil llamados European Textile Recycling Hubs o ReHubs, financiados por fondos estructurales de la Unión Europea (Salinas, 2019); así mismo, ésta empezó a implementar una etiqueta ecológica que pueden colocar en sus artículos aquellos productores que respeten los criterios ecológicos, y que garantiza un uso limitado de sustancias nocivas y una reducción de la contaminación del agua y del aire (Parlamento Europeo, 2020).

A nivel de comercial, diferentes empresas también se han visto obligadas a implementar diferentes cambios en sus modelos de producción, por ejemplo, Adidas la cual dio a



conocer sus nuevos tenis EQT Support ADV, creados enteramente con desechos plásticos reciclados de los océanos en asociación con la ONG Parley. Por otro lado, H&M y Zara quienes comenzaron a ofrecer a sus clientes bonos de reducción a cambio de prendas ya utilizadas las cuales van a dar a las empresas recicladoras que crean materias primas ecológicas, o Acne Studios que optó por hacer menos colecciones al año, y hasta hace algunos años, el prestigioso diseñador de alta costura Azzedine Alaïa quien dejó de crear colecciones para cada una de las semanas de la moda y solo hacer desfiles cuando la colección estuviera verdaderamente lista (Ramírez, 2018).

Un enfoque similar es el de Thread, una empresa textil que produce poliéster reciclado a partir de botellas de plástico. Las botellas de plástico provienen de Haití y Honduras y son lavadas en fábricas directamente en el lugar, trituradas y finalmente llevadas a Norteamérica como chips para su procesamiento en pañuelos de papel (ESCHBERGER, 2019).

Como se puede evidenciar, hoy en día la industria textil requiere un cambio estructural en el que su enfoque se base en la utilización consciente de los recursos con el fin de disminuir las pérdidas por desperdicios, corresponder a las nuevas políticas nacionales e internacionales y suplir la nueva demanda del mercado cada día más interesado en la protección ambiental (Sandin & Peters, 2018).

Dada la problemática ambiental expuesta anteriormente y partiendo del hecho de que el PET es un material potencialmente reciclable, este trabajo se centró en explorar el uso de fibras PET en la industria textil y diferentes tratamientos que mejoren sus propiedades. La exploración de los diferentes tratamientos que se realicen a estas fibras permite conocer cómo se pueden mejorar las propiedades de estos materiales con el fin de que sean utilizadas en la industria textil no sólo para prendas de uso general sino también con fines específicos. Por lo tanto, se plantean los objetivos que se describen a continuación.

1.2 Objetivos

a. Objetivo general:

Explorar el uso de fibras PET en la industria textil mediante un estudio de vigilancia tecnológica.

b. Objetivos específicos:

- Describir la obtención de fibra PET para su uso como materia prima en la industria textil.



- Describir y caracterizar los tratamientos y procedimientos realizados sobre fibras PET para utilización textil.
- Clasificar las aplicaciones de la fibra PET tratada dependiendo de las características obtenidas después de los tratamientos descritos.

Capítulo 2: Aspectos metodológicos

2.1 Metodología

El presente estudio, se desarrolló mediante un estudio de vigilancia tecnológica que de acuerdo a las normas UNE (Una Norma Española) es: “un proceso organizado, selectivo y sistemático, para captar información del exterior y de la propia organización sobre ciencia y tecnología, seleccionarla, analizarla, difundirla y comunicarla, para convertirla en conocimiento con el fin de tomar decisiones con menor riesgo y poder anticiparse a los cambios” (LISA Institute, 2020).

Este proceso pretende dar respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es el objetivo a conocer?
- ¿Qué debemos vigilar para ello?
- ¿Quién puede proporcionarnos estos datos?
- ¿Cómo podemos capturar, tratar y organizar esa información para extraer su valor?
- ¿Qué herramientas necesitamos para ello?
- ¿A quién y cómo comunicar los resultados obtenidos?

Para lograrlo, el estudio de vigilancia tecnológica cuenta con las siguientes etapas:



Figura 1: Etapas del estudio de vigilancia tecnológica

Fuente: Observatorio Tecnológico UA (s.f.)

a. Etapa 1: Diagnóstico y priorización

Reto: identificar, precisar y detallar el tema a vigilar.



Para ello, se determinaron las tecnologías a vigilar, las necesidades de información y los **Factores Críticos de Vigilancia (FCV) o Key Intelligence Topics (KIT)** que nos ayudaron a diseñar una estrategia eficaz para cada caso. Estos constituyen técnicas estratégicas para la formulación de prioridades y pueden ser:

- **KIT sobre decisiones estratégicas:** referidos a cuestiones estratégicas para las organizaciones, sobre todo relativas a la planificación estratégica y su implementación (ej. política de I+D+i, planes de negocio, decisiones de inversión, internacionalización, etc.).
- **KIT sobre señales tempranas:** capaces de identificar potenciales amenazas y oportunidades futuras para la organización (ej. tendencias, nuevas tecnologías, cambios legislativos, nichos de mercado, etc.)
- **KIT sobre actores clave:** relativos al seguimiento de actores clave en el mercado (ej. competidores, clientes, proveedores, socios, reguladores, tomadores de decisiones públicas, etc.

Para el caso de este trabajo en particular, se identificaron KIT sobre señales tempranas ya que el principal objetivo es reconocer oportunidades futuras en forma de tendencias y nuevas tecnologías para la industria textil, que contribuyan a la sostenibilidad ambiental.

b. Etapa 2: Búsqueda y captura de información

Retos: diseñar e implementar la estrategia de recopilación de información.

Para ello, se definieron los objetivos de la búsqueda de información y se elaboró la estrategia para identificar las necesidades, localizar la información y capturarla de una manera organizada. Esto implica tareas como: identificación de palabras clave, validación de expertos, selección de fuentes de información relevantes, formulación de ecuación de búsqueda y elaboración del corpus o registros realizados.

En esta etapa, es muy importante la selectividad de información para gestionar la infoxicación o sobreinformación encontrada en internet. Para ello, se requiere de habilidades en monitorización de información, capacidad de análisis crítico y competencias digitales que garanticen información confiable y de calidad.

En el siguiente subcapítulo 2.2: Fuentes de información y herramientas de consulta, se hará énfasis en las fuentes de información y herramientas de consulta utilizadas.

c. Etapa 3: Análisis de información

Retos: procesar y analizar la información encontrada para filtrar lo relevante.



Para ello, se combinan criterios de validación de la información, técnicas analíticas de información y herramientas informáticas especializadas que ayuden al equipo a seleccionar la información relevante según los objetivos de búsqueda.

En esta fase, resultan de ayuda herramientas como: mapas tecnológicos, software de patentes, gestores bibliográficos, visualización de información o software integrales de vigilancia tecnológica.

d. **Etapas 4: Valorización de información relevante**

Retos: elaborar **productos** con los resultados obtenidos.

Para ello, resulta fundamental analizar detenidamente la **información de valor** obtenida para la toma de decisiones y elaborar con sus resultados productos de vigilancia e inteligencia tecnológica efectivos.

Este estudio de vigilancia tecnológica se apoyó en el uso de tablas de caracterización incluidas dentro del informe, con el objetivo de que representen de manera resumida y clara la información de valor encontrada.

2.2 **Fuentes de información y herramientas de consulta**

Para llevar a cabo el estudio de vigilancia tecnológica, se inició determinando como objeto de estudio las fibras PET para uso en la industria textil. Luego, se dio comienzo a la recopilación de información la cual se realizó mediante diferentes fuentes de información y herramientas de consulta como lo son las bases de datos especializadas: ScienceDirect, Scopus, Dialnet plus, Google académico; trabajos de grado y proyectos de investigación presentes en repositorios académicos de diferentes universidades, artículos de prensa y, por último, documentos divulgativos como libros, informes corporativos e informes gubernamentales. La ecuación de búsqueda a utilizar se basará en combinaciones de las siguientes palabras: Textile, Recycling, Fibre, Circular Economy, Cloth, PET fiber, entre otros.

Para iniciar, se recolectó información correspondiente a los procesos de obtención de fibra PET para su uso como materia prima en la industria textil. A partir de esto se **exploraron** los diferentes tratamientos y procedimientos aplicados a esta fibra, para luego, describirlos teniendo en cuenta su clasificación (químico, mecánico y/o térmico), equipos utilizados, procedimiento, propiedades adquiridas por el material después del tratamiento, entre otros. Por último, se clasificaron las aplicaciones de la fibra PET tratada dependiendo de las características obtenidas después de los tratamientos descritos.



2.3 Actividades

Tabla 1: Objetivos y actividades del proyecto

OBJETIVO		ACTIVIDADES
1	Describir la obtención de fibra PET para su uso como materia prima en la industria textil.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Llevar a cabo una revisión literaria 2. Documentar los hallazgos de todos los procesos de obtención de fibra PET encontrados.
2	Describir y caracterizar los tratamientos y procedimientos realizados sobre fibras PET para utilización textil.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Llevar a cabo una nueva revisión literaria relacionada con los tratamientos ejercidos sobre fibras PET para utilización textil. 2. Describir los tratamientos encontrados teniendo en cuenta: clasificación (químico, mecánico y/o térmico), equipos utilizados, procedimiento, propiedades del material después del tratamiento, entre otros. 3. Documentar hallazgos en una tabla de caracterización.
3	Clasificar las aplicaciones de la fibra PET tratada dependiendo de las características obtenidas después de los tratamientos descritos.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Llevar a cabo una revisión literaria con el objetivo de identificar las propiedades óptimas que debe tener una superficie textil de acuerdo a diferentes aplicaciones. 2. Correlacionar las propiedades obtenidas por la fibra PET luego de los tratamientos con las posibles aplicaciones. 3. Documentar hallazgos en una tabla.

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 3: Marco de referencia para el estudio

3.1 Marco conceptual y teórico:

a. Conceptos base

Para una mejor comprensión del presente estudio de vigilancia, hay un conjunto de conceptos claves a tener en cuenta:

PET: El Tereftalato de Polietileno (PET) es un Poliéster Termoplástico y se produce a partir de dos compuestos principalmente: Ácido Tereftálico y Etilenglicol, aunque también puede obtenerse utilizando dimetil tereftalato en lugar de Ácido Tereftálico, los cuales al polimerizar en presencia de Tereftálico, catalizadores y aditivos producen los distintos tipos de PET.

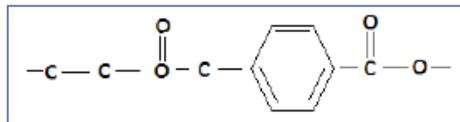


Figura 2: Estructura química del PET

Fuente: Curso de fundamentos de ciencia de materiales - Universidad Politécnica de Valencia (s.f)

En la tabla 2 se presentan las principales características y propiedades con las que cuenta el Tereftalato de Polietileno, las cuales lo diferencian de los demás polímeros:

Tabla 2: Características y propiedades del PET

Resistencia al ataque químico	Resistente a: combustibles, alcoholes, grasas, éter ácidos y bases diluidas
Solubilidad	Insoluble: solventes orgánicos Solubilidad en menor grado: solventes halogenados, aromáticos, cetonas ácidos y bases fuertes
Resistencia al envejecimiento	Buena resistencia: Temperatura ambiental, radiaciones solares, humedad
Estabilidad térmica	Estable a temperaturas $\leq 71^{\circ}\text{C}$ Cristalizado estable a temperaturas $\leq 230^{\circ}\text{C}$
Permeabilidad	Excelente barrera al CO_2 y O_2
Densidad	Estado amorfo: 1,33 - 1,37 g/cm ³ Estado cristalino: 1,45 - 1,51 g/cm ³
Conductividad térmica	Buen aislamiento térmico = 0,24 W/m x K
Absorción de agua	<0,7% durante 24 horas
Propiedades ópticas	Transmisión de luz: 89% Índice de refracción: 1.576
Propiedades biológicas	No presenta vulnerabilidad al ataque microbiológico
Degradación térmica	La temperatura soportable por el PET sin deformación, ni degradación, aventaja a la de otros materiales, ya que este material se extrusiona a temperaturas superiores a 250°C, siendo su punto de fusión de 260°C.
Biorientación	Permite lograr propiedades mecánicas y de barrera con optimización de espesores.

Fuente: Adaptado de Textos científicos (2005a), Curso de fundamentos de ciencia de materiales - Universidad Politécnica de Valencia (s.f), Beltran (2012), Elias & Jurado (2012), Ojeda (2011a), Martinez (2013), Muñoz (2012), Sánchez & Paredes (2014).

Dentro de sus principales aplicaciones podemos encontrar:

- **Envases y botellas de plástico reciclable:** Dicho termoplástico es muy usado en la producción de envases o bebidas, como los refrescos y botellas de agua. Se convierte así, en un material de uso diario en el sector industrial, gracias a su rigidez y dureza. Aunque, también, influye el hecho de poder ser reciclado en su totalidad, hecho que ayuda a fabricar otras muchas botellas y envases de plástico a medida.
- **Textiles de todo tipo:** El *PET* es un tipo de plástico que se utiliza en la industria textil para la fabricación de distintas prendas de ropa. De hecho, se convierte en un excelente sustituto al lino e incluso al algodón.
- **Film o películas fotografías:** Este polímero plástico también se usa para la creación de distintas películas fotográficas. Aunque, también es muy útil para crear el papel básico de impresión en rayos X.



- **Fabricación de maquinaria:** En la actualidad, el tereftalato de polietileno se utiliza para la fabricación de distintas máquinas expendedoras y recreativas
- **Artículos de iluminación:** Para la fabricación de distintas lámparas de diseño. De hecho, el PET resulta ser uno de los materiales más atractivos en el diseño de iluminación, tanto exterior como interior.
- **Otros elementos de publicidad:** Como, por ejemplo, displays o letreros para la comunicación visual. Asimismo, también suele emplearse como material idóneo para la creación de expositores en comercios y todo tipo de ferias o eventos. (Servei Estació, s.f.)

Fibra: Una fibra textil es un filamento cuya característica principal es su elevada longitud con relación a su diámetro. Los diámetros y las longitudes varían de unas a otras, según su procedencia (Flores, 2011).

Hilo: Se denomina hilo al conjunto de fibras textiles, continuas o discontinuas, que se tuercen juntas alcanzando una gran longitud y que es directamente empleado para la fabricación de tejidos y para el cosido de estos. (Instituto de Textil Nacional, 2019)

Reciclaje: El reciclaje es un proceso de transformación mediante técnicas fisicoquímicas o mecánicas cuyo resultado es la obtención de nuevas materias primas a partir de materiales usados o desechados. (Recytrans, 2016)

Monómero: Los monómeros son moléculas pequeñas o simples que constituyen la unidad estructural básica o esencial de moléculas más grandes o complejas denominadas polímeros. (Bolívar, 2018)

Polímero: Un polímero es una macromolécula que contiene un gran número de unidades repetidas. Por tanto, utiliza una gran cantidad de monómeros para la producción de este material. Los monómeros se unen entre sí mediante enlaces covalentes después de pasar por el proceso de polimerización. (StrephonSays, s.f)

3.2 Industria textil y su impacto ambiental

Los retos a los que se enfrenta la industria textil hoy en día, especialmente ambientales y de imagen, la obligan a buscar y ejercer diferentes cambios en su cadena de suministro y proceso productivo desde la obtención de materia prima hasta el manejo de los desechos. El modelo actual de la industria textil está expresado por un flujo lineal de materiales, en el que los recursos son extraídos una y otra vez de un sistema natural y finalmente se

devuelven al medio ambiente en forma de desechos, normalmente perjudiciales. Esta cadena se puede ver resumida en la figura 3. La industria textil se caracteriza por la extracción de recursos no renovables para el abastecimiento de materia prima, una alta demanda de energía y la utilización de altos volúmenes de sustancias químicas (Keßler, Matlin, & Kümmerer, 2021).

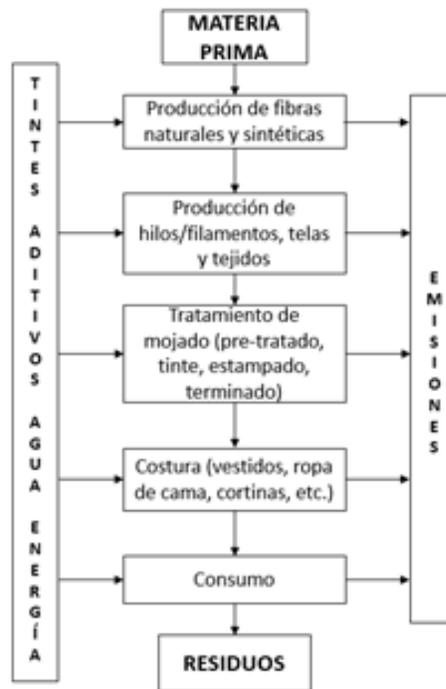


Figura 3: Diagrama de flujos simplificado de la cadena de suministro textil

Fuente: Adaptado de *Environmental Impacts of the Textile Industry and Its Assessment Through Life Cycle Assessment* (p. 3), por Choudhury (s.f.)

El recurso más consumido a lo largo de todo el proceso de producción textil es la electricidad, usada para maquinaria de conducción, refrigeración, control de temperatura, iluminación y equipo de oficina. Sin embargo, la generación de residuos en esta industria es de los factores más preocupantes; el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente declaró que: "En todo el mundo, se estima que la industria es responsable de verter entre 300 y 500 millones de toneladas de metales pesados, disolventes, lodos tóxicos y otros desechos en las aguas cada año". De aquí surge una búsqueda exhaustiva por modelos más limpios (Choudhury, s.f.)

Uno de los modelos de producción y consumo más relevantes hoy en día y que, de hecho, es propuesto constantemente como cambio de enfoque en la industria textil es la Economía Circular la cual está definida por procesos en los que se reutilizan y optimizan los materiales (en este caso la ropa) incluidos los residuos y desechos, para combatir el



impacto ambiental (Burgos, 2021). El interés de su aplicación a la industria ha sido impulsado por diferentes políticas como el Plan de Acción de Economía Circular de la Unión Europea del 2015. Algunos ejemplos son las ventas de segunda mano, la utilización de materiales reciclados en la fabricación de las telas, el alquiler de ropa, el “Slow Fashion” que consiste en fabricar prendas de alta calidad de manera artesanal, entre otros (González, 2021).

A continuación, en la tabla 3 se presenta una categorización de las diferentes fibras textiles manejadas en la industria.

Tabla 3: Categorización de fibras textiles

FIBRAS TEXTILES			
	Propiedades y características	Aplicaciones	Tiempo de degradación
Algodón	Es una fibra natural. Dentro de sus propiedades se encuentran: alta higroscopicidad, capacidad de contracción y es sensible a la actividad de microorganismos y a las arrugas. El algodón crece en cápsulas alrededor de sus semillas.	Tejidos y ropa de punto, toallas para el cuerpo y cobertores de cama. También se combina con otras fibras como el poliéster y el rayón.	2 meses
Lana	Es una fibra natural. Rizada en apariencia, elástica, higroscópica, capacidad de aislante térmico. Ésta crece de la piel de las ovejas.	Prendas de vestir como: chaquetas, trajes, gorros, etc. También alfombras, fieltro y tapicería.	1 año
Lino	Es la fibra vegetal más fuerte, tiene poca elasticidad y es suave al tacto. Además, tiene alta absorbencia y es buen conductor de calor. Se obtiene a partir de la planta Lino	Prendas de vestir como trajes, vestidos, faldas, etc. También en manteles y sábanas. En algunas ocasiones se combina con algodón.	2 semanas
Yute	Es una fibra natural. Se deteriora	Hilos de unión para	--

	rápida-mente ante la humedad, baja conductividad térmica y cuenta con propiedades aislantes y antiestáticas. El Yute se toma de una gran planta llamada de la misma manera; es bastante económica.	alfombras, telas gruesas y baratas, embolsado pesado.	
Nylon	Es una fibra sintética. Alta elongación y elasticidad, excelente resistencia a la abrasión, muy fuerte y durable. La fibra que lo conforma es una poliamida sintética de cadena larga.	Prendas de vestir como ropa interior, leggings y medias. También en muebles del hogar y aplicaciones industriales como paracaídas y airbags.	Entre 100 y 1000 años.
Poliéster	Es una fibra sintética. Termoplástico, buena fuerza e hidrófobo. No presenta arrugas y es bastante resistente a la abrasión. La sustancia que conforma la fibra es un polímero sintético de cadena larga.	Prendas de vestir tejidas, camisas, pantalones, sombreros, etc. También en muebles del hogar y usos industriales como cinturones de seguridad.	Entre 100 y 1000 años.
Acrílico	Es una fibra sintética. Suave, cálida al tacto y en general, bastante similar a la Lana. Resistente a polillas y hongos. La sustancia formadora de la fibra es cualquier polímero de cadena larga compuesto por al menos 85% en peso de unidades de Acrilonitrilo	Prendas de vestir y muebles del hogar.	Entre 100 y 1000 años.

Fuente: Adaptado de Máster logística (2012), FAO (2021), Coat (2021), Portillo (2020a), Portal Vida sana (2021), WearItSlow (2018), Portillo (2020b)

3.3 Obtención de PET

El PET o Polietileno Tereftalato es una resina que pertenece a la familia de los poliésteres, cuyo nombre se atribuye a que contiene el grupo químico éster.



La producción química o síntesis del PET se lleva a cabo mediante dos etapas:

- a. La síntesis del monómero de poliéster –bis hidroxietil tereftalato (BHET)–.
- b. La reacción de Policondensación del monómero.

a. La síntesis del monómero

La síntesis se puede llevar a cabo mediante dos reacciones. La más antigua es la transesterificación entre el dimetil tereftalato (DMT) y el etilén glicol (EG). Este proceso es menos utilizado en la actualidad, ya que produce metanol como subproducto, el cuál puede generar más cantidad de emisiones de compuestos orgánicos volátiles, lo que causa un mayor impacto ambiental. En la figura 4 se presenta un esquema general del proceso para la obtención del monómero a partir de la reacción de transesterificación.

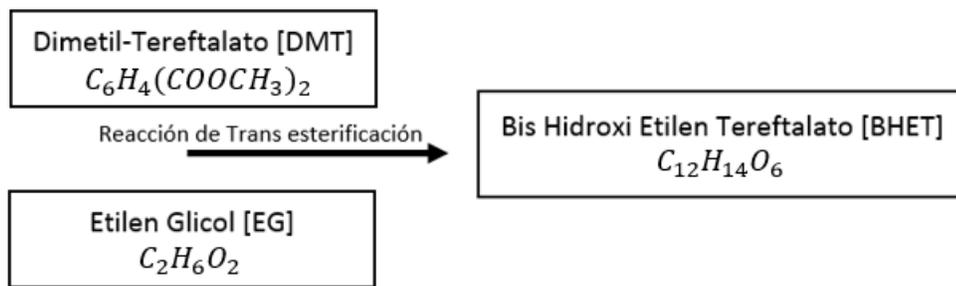


Figura 4: Reacción de transesterificación para monómero BHET

Fuente: Adaptado de “Detrás de la producción del PET”, Mendez (2016)

El otro método, de mayor importancia comercial y el más utilizado actualmente, consiste en la Esterificación directa del ácido tereftálico (TPA) con el etilén glicol (EG), que, a diferencia del anterior método, genera agua como subproducto de eliminación. En la figura 5 se presenta un esquema general del proceso para la obtención del monómero a partir de la reacción de esterificación.

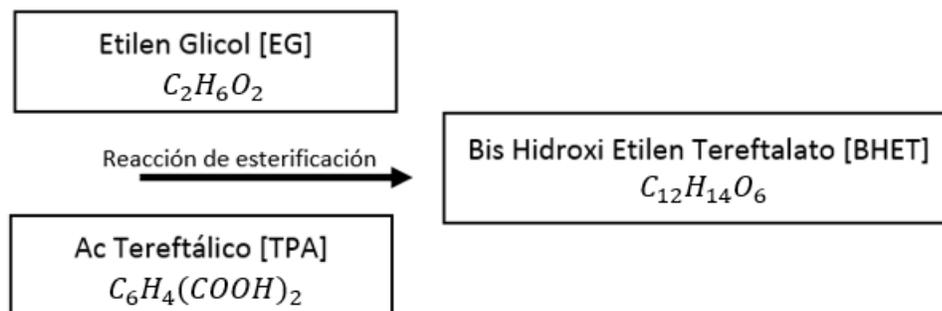


Figura 5: Reacción de esterificación por monómero BHET

Fuente: Adaptado de “Detrás de la producción del PET”, Mendez (2016)

El proceso con TPA ofrece ventajas frente al que se realiza con DMT, que han motivado que en la actualidad las plantas procesadoras lo utilicen principalmente:

- El ácido tereftálico es más económico.
- Menor tiempo de reacción para lograr el peso molecular.
- El uso de agua en vez de metanol como agente de condensación.

La esterificación directa se puede llevar a cabo en ausencia de algún catalizador, ya que la reacción se basa en un equilibrio químico regulado por las condiciones de reacción y de la remoción del agua residual, producto de la misma esterificación, que es destilada para lograr la reacción completa. Sin embargo, industrialmente se utilizan compuestos de antimonio y titanio como catalizadores, con el fin de acelerar y hacer más eficiente la reacción. Así, en ambos procesos –tanto en el que utiliza DMT como en el que se basa en TPA– se produce un monómero intermedio, el bis hidroxí etil tereftalato (BHET).

La reacción se lleva a cabo a altas temperaturas, en un rango entre 260 y 290°C, debido a la baja solubilidad del ácido tereftálico en el etilén glicol. El ácido tereftálico y el etilén glicol se mezclan con el catalizador en un tanque donde se forma una pasta, que posteriormente es transferida a un sistema de reactores de esterificación. El etilén glicol recuperado se retorna al primer reactor esterificador del sistema, mientras que el vapor de agua se condensa y se descarga al sistema de tratamiento de agua residual.

b. Reacción de policondensación del monómero

• Policondensación en estado fundido (MMP)

El monómero BHET obtenido del sistema esterificador se bombea a los reactores de polimerización, que pueden variar en número, diseño y condiciones de operación,



dependiendo de la tecnología industrial utilizada. Los procesos que se realizan en ellos pueden resumirse en tres categorías:

- Proceso con menor tiempo de residencia y alta temperatura.
- Proceso con tiempo de residencia y temperatura medios.
- Proceso con tiempo de residencia mayor y temperatura menor.

Durante esta etapa, el PET presenta un incremento en la longitud de la cadena del polímero, con un rango de viscosidad entre 0.45 y 0.65 decilitro/gramos y un contenido entre 30 y 150 ppm de acetaldehído.

Enseguida el polímero en estado fundido se convierte en partículas sólidas y es cristalizado mediante un sistema previo de peletizado, que tiene un efecto importante en el tamaño, forma, densidad, contenido de agua, grado de cristalinidad y finos en el pellet de poliéster. En la figura 6 se presenta un esquema general del proceso de la policondensación en estado fundido (MMP) del PET (Mendez, 2016).

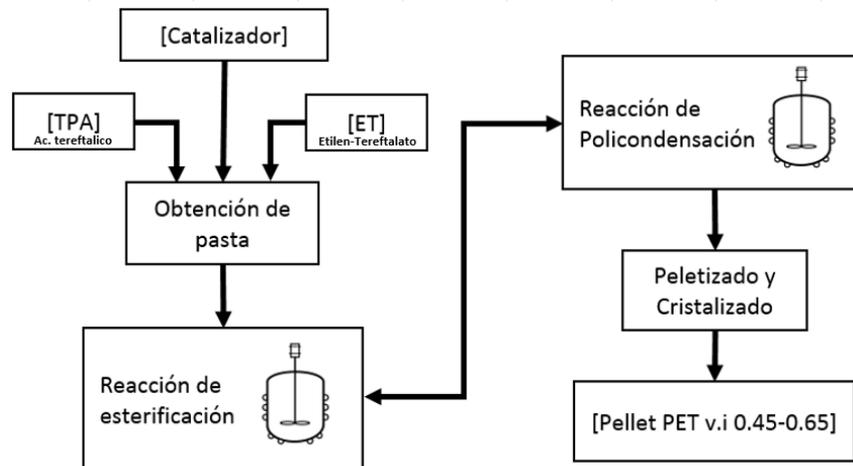


Figura 6: Proceso de la policondensación en estado fundido (MMP)

Fuente: Adaptado de “Detrás de la producción del PET”, Mendez (2016)

En este punto, el PET obtenido es apto para la industria textil, ya que no es necesario un rango de viscosidad muy alto. Sin embargo, para que el PET pueda volverse apto para la producción de botellas y otras industrias serán necesarios otros pasos. En algunas fuentes, los procesos de cristalización y Policondensación en Estado Sólido SSP se presentan como pasos independientes, mientras que, en otras, la cristalización se incluye intrínsecamente el proceso de policondensación SSP. Como tal, el objetivo de estos pasos adicionales es aumentar la longitud de las cadenas y por ende, su viscosidad.

- **Cristalización**

Con este término se describe el cambio de estructura de los polímeros semicristalinos y que consiste en el fenómeno físico con el cual las macromoléculas pasan de una estructura en la cual su disposición espacial es desordenada (estructura amorfa, transparente a la luz) a una estructura uniforme y desordenada (estructura cristalina, opaca a la luz) que le confiere a la resina una coloración blanca lechosa. El proceso industrial consiste en un tratamiento térmico a 130- 160 °C, durante un tiempo que puede variar de 10 minutos a una hora, mientras el gránulo, para evitar su bloqueo, es mantenido en agitación por efecto de un lecho fluido o de un movimiento mecánico.

Con la cristalización, la densidad del PET pasa de 1.33 g/cm³ del amorfo a 1.4 del cristalino. (Textos científicos, 2005b)

- **Policondensación en Estado Sólido (SSP)**

La Policondensación en estado sólido es la continuación a la policondensación fase fundida (MMP), llevada a cabo a una temperatura menor que en la fase de polimerización anterior. La finalidad principal de la etapa de SSP es cristalizar la resina poliéster, aumentar la viscosidad a un rango de 0.75 a 0.85% y reducir el contenido de acetaldehído a menos de 1ppm.

De las etapas de policondensación previamente discutidas, la policondensación en estado sólido (SSP) es el proceso caracterizado por un peso molecular mucho más alto y una estabilidad térmica mayor con respecto a los PET polimerizado por MMP. En la figura 7 se presenta un esquema general del proceso de la policondensación en estado sólido del PET (Mendez, 2016).

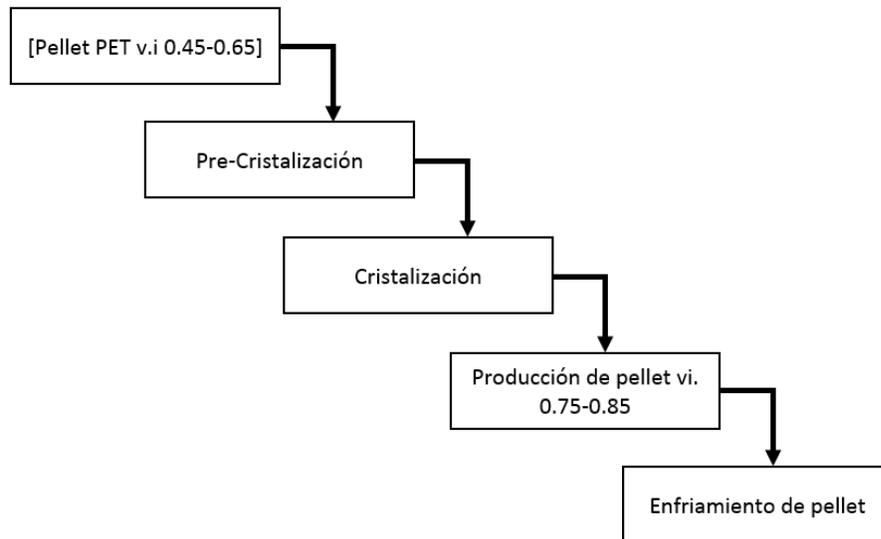


Figura 7: Proceso de la policondensación en estado sólido (SSP)

Fuente: Adaptado de “Detrás de la producción del PET”, Mendez (2016)

3.4 Métodos de reciclaje PET

En lo que se refiere a reciclaje textil, éste se posiciona como un camino para dar frente a la escasez de recursos y diversos efectos ambientales negativos dado que reduce las entradas de material virgen y de desechos. El reciclaje textil se clasifica normalmente como mecánico, químico o térmico dependiendo de las operaciones o procesos que se lleven a cabo. El reciclaje químico suele referirse a la despolimerización en el caso de fibras sintéticas derivadas del petróleo o disolución en el caso de fibras naturales, que, una vez llevadas a niveles moleculares, se repolimerizan y se vuelven a hilar formando nuevas fibras (Sandin, G., & Peters, G. M, 2018). De todos los tipos de reciclaje, el mecánico es el más posicionado en la industria textil, esto debido principalmente a que sus costos asociados son más bajos que los del reciclaje químico o térmico. Sin embargo, de igual manera dan como resultado, materiales con menor calidad (Ribul et al., 2021).

El reciclaje textil se clasifica como “downcycling” y “upcycling” dependiendo de si el material reciclado es de menor o mayor valor que el producto original. Otra de las clasificaciones a tener en cuenta del reciclaje en general es “closed-loop” y “open-loop”. La primera, se refiere a cuando el material reciclado de un producto es usado para la fabricación del mismo. Mientras que el reciclaje “open-loop” se refiere a cuando el material reciclado de un producto es usado en un producto diferente. En la figura 8 se puede encontrar un resumen de todas las clasificaciones de reúso y reciclaje en la industria textil mencionadas previamente (Sandin, G., et al. 2018).

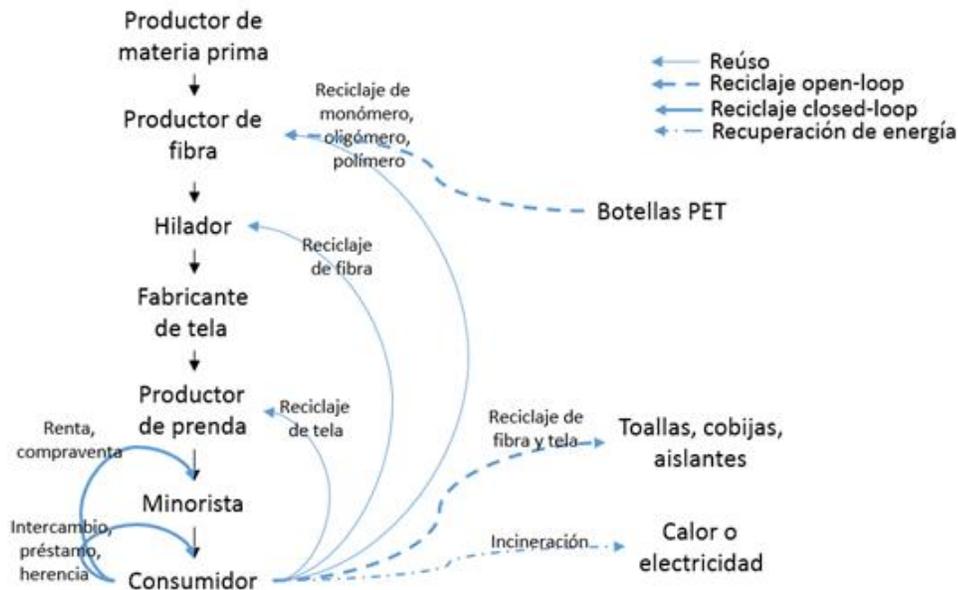


Figura 8: Clasificación de rutas de reuso y reciclaje textil

Fuente: Adaptado de *Environmental impact of textile reuse and recycling - A review* (p. 356), por Sandin, G., & Peters, G. M., *Journal of Cleaner Production* (2018).

El método LCA o “Análisis de ciclo de vida” se basa en un enfoque científico sistemático que evalúa el impacto ambiental del ciclo de vida completo de un producto o servicio, y que, por lo tanto, permite medir las mejoras ambientales que trae consigo la implementación de determinado modelo. De acuerdo a Sandin & Peters (2018), éste es el método que más prevalece en las publicaciones de investigación que estudian el impacto ambiental del reuso y reciclaje en la industria textil. Ellos atribuyen esta predominancia a la consideración de los investigadores de que el LCA es esencial a la hora de capturar las consecuencias ambientales relevantes del reuso y reciclaje.

Mediante este método, se han estudiado beneficios ambientales potenciales de diferentes sistemas de reuso y reciclaje textil en los que se afirma que estos, en la mayoría de los casos, son opciones de manejo de residuos preferibles que la incineración y los vertederos ya que, en general, tienen un menor impacto ambiental. Sin embargo, vale la pena recalcar que hay factores a tener en cuenta que pueden hacer que el reuso y el reciclaje perjudiquen y generen un aún mayor impacto ambiental, por ejemplo: bajas tasas de reemplazo de material, el uso de energía fósil o la evasión de procesos que al final son relativamente limpios (Sandin, G., et al. 2018).



a. Reciclaje mecánico

El reciclaje mecánico de botellas PET para su utilización en la industria textil se divide en los siguientes pasos:

- **Acopio del material:**

El acopio es simplemente la recolección del material, ya sea en centros de acopio ya establecidos o recolección directa. En este punto se debe garantizar que las botellas sean de PET y no de otro material como ser PVC, PEBD, PEAD, PP; no estén sucias con aceites, pinturas, cemento, etc.; no estén llenas de agua u otros líquidos y que sean de un material uniforme ya sea PET cristal (incoloro), PET verde o PET celeste.

- **Prelavado:**

El material desembalado es transferido mediante una cinta transportadora al pre-lavador (tambor giratorio cribado) donde las botellas son liberadas de la suciedad gruesa exterior (principalmente tierra y piedras).

- **Remoción de etiquetas:**

Por medio del saca-etiquetas, gran parte de las botellas son despojadas de las etiquetas que tenía adheridas. El equipo se compone de un eje con paletas que al girar a gran velocidad despoja a las botellas de las etiquetas. Las paredes metálicas del equipo presentan perforaciones, de aproximadamente 5cm, que permiten la eliminación de las etiquetas, mientras que las botellas continúan su marcha hacia la siguiente etapa del proceso.

- **Detección y separación de metales:**

Luego del saca-etiquetas todas las botellas pasan por un detector/separador de metales encargado de la eliminación, por ejemplo, de latas de hojalata o aluminio y las botellas que contienen algún elemento metálico.

- **Cinta de clasificación:**

En esta zona trabajan varias personas inspeccionando visualmente las botellas que se desplazan sobre una cinta transportadora, separando envases de PVC, PC, PEAD, PP u otros plásticos de la corriente de envases de PET. Así mismo, se separan otros materiales tales como maderas, piedras, basura, etc.

- **Detector de PVC:**

La corriente de botellas pasa por este equipo, que al detectar la presencia de un envase o fragmento de PVC (no detectado y eliminado en la cinta de clasificación) lo expulsará, hacia la cinta de descarte, por intermedio de unos picos que expulsan aire comprimido. El equipo solo podrá expulsar fragmentos de PVC mayores a 5 mm.

El principio de funcionamiento de este equipo se basa en la emisión de rayos X.

- **Molienda de botellas:**

En este paso, las botellas transportadas neumáticamente caen en la garganta del molino, el cual, mediante un juego de cuchillas giratorias y fijas, tritura la botella hasta obtener escamas de un tamaño de 12 mm. Luego pasan a través de una criba metálica y caen dentro de la primera batea de separación por flotación.

- **Lavado y separación de plásticos:**

El material molido proveniente del molino cae en una batea llena de agua con circulación por bombeo y desborde. En el fondo de la batea se halla un tornillo sin fin que gira lentamente. Las etiquetas, las tapitas y la guarnición de las tapitas están fabricadas con materiales que tienen una densidad inferior a la del agua, por lo tanto, flotan. El PET tiene una densidad mayor que el agua, por lo tanto, se hunde y es transportado por el tornillo sin fin.

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. La soda cáustica permite la eliminación de los adhesivos que pueden contener las botellas por el colocado de etiquetas. Luego del lavado en caliente, las escamas de PET pasan por una serie de bateas de enjuague con agua.

- **Eliminación de agua por centrifugación (secado):**

Mediante un tornillo sin fin las escamas de PET son transportadas a la parte inferior de una centrífuga. Una vez que el material entra a la centrífuga asciende y es proyectado contra una camisa perforada que permite escapar el agua (Lopez, 2016).

El secado también se puede realizar 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 (Ruiz & Mansilla, 2009).

- **Ciclón:**

La corriente de aire que conduce las escamas de PET desemboca en un ciclón separador. Mediante una brusca expansión del diámetro de la cañería, las escamas pierden velocidad



y caen en la cinta de inspección mientras que la corriente de aire es conducida al exterior, previo paso por una manga filtrante de tela que retiene las partículas de polvo de PET que se originan en el transporte neumático.

- **Cinta de inspección:**

El material proveniente del ciclón cae en una cinta que lo arrastra a medida que es inspeccionado visualmente y liberado de contaminantes tales como piedras, metales y otros que pudieran haber llegado hasta esta etapa del proceso.

Luego, las escamas de PET son transportadas mediante una corriente de aire proveniente de un soplante hasta el silo de almacenamiento.

- **Silo de almacenamiento:**

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 sinfín) 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).

- **Extrusión:**

El scrap 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. 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.

El tamiz debe ser recalentado para que el poliéster no se endurezca mientras fluye en estado líquido a través de este.

- **Enfriado:**

Las fibras obtenidas por la extrusión se enfrían y endurecen al hacer contacto con el aire.

- **Bobinado:**

Las fibras resultantes convergen y son encauzadas hacia el interior de una guía que junta todos los filamentos en un solo hilo. Luego, el hilo pasa alrededor de unos rodillos que lo conducen a un compartimento, donde el aire lo zarandea para enredar los filamentos y que queden unidos. Una máquina devanadora enrolla el hilo a una velocidad superior a los 200 kilómetros por hora.

- **Inspección:**

Se coloca una muestra de cada tanda de producción sobre unas hebras de hilo negro que hace que el hilo más claro destaque. Se deshilachan ambos extremos de los hilos con una cuchilla para que sea más fácil examinarlas en el microscopio. Se visualiza la imagen aumentada en una pantalla y se cuenta el número de filamentos.

- **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.

Previo al estirado, se debe aplicar una temperatura por encima de los 95-100°C a la fibra. Entonces, el hilo es arrastrado sobre unos rodillos de goma caliente, por lo que el proceso lo estira y realinea a las moléculas.

- **Retorcido y ovillado (bobina)**

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 grabados, torciéndolas o aplanando uno de sus lados.

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

- **Cortado y embalado:**

Finalmente, el tow se corta en las longitudes predeterminadas y se embala, ajustándolo con zunchos de plástico. El producto final está listo para ser comercializado bajo el nombre de fibra corta de poliéster, de acuerdo a las especificaciones solicitadas y requeridas por el mercado (Lopez, 2016).

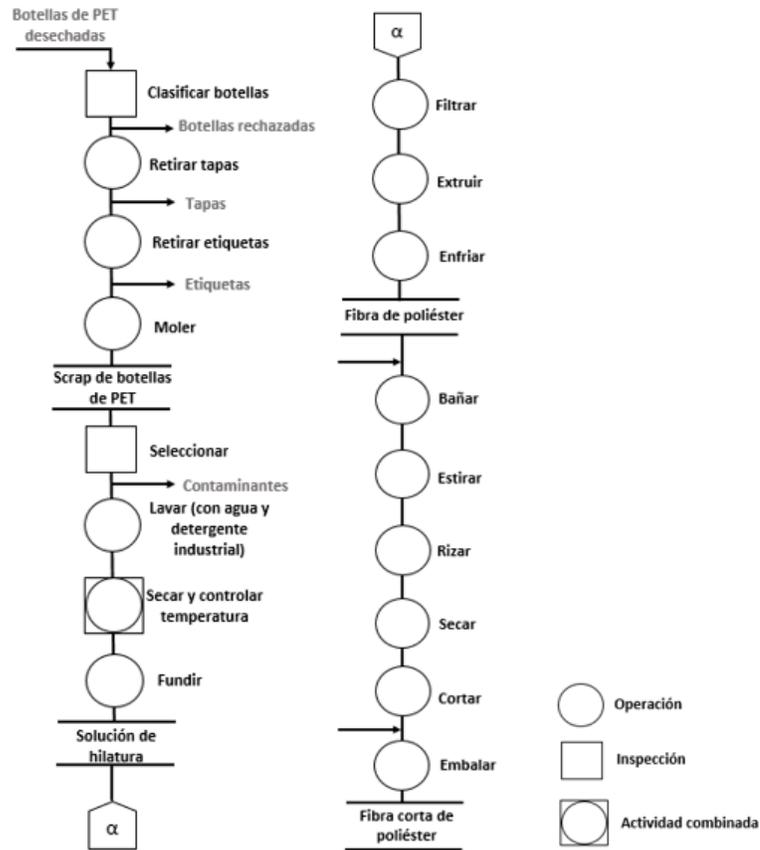


Figura 9: Diagrama de operaciones del proceso de producción de fibra corta de poliéster a partir de botellas PET

Fuente: Adaptado de Ruiz & Mansilla (2009)

Un plástico que ha sido utilizado pierde cierto grado de sus propiedades ya sea debido al inicio de su degradación que puede sufrir durante su uso o por la presencia de sustancias que se encuentren en el entorno. Esta atenuación de las propiedades hace que los plásticos reciclados mecánicamente deban emplearse en la fabricación de productos diferentes a los de su uso inicial. Sin embargo, estudios han demostrado que el RPET (PET reciclado) posee un módulo de Young menor, mayor elongación a la rotura y mayor resistencia al impacto, es decir, mayor resiliencia. Esto puede atribuirse a la experiencia térmica que da el material reciclado. Por otra parte, nos encontramos que el RPET es más dúctil dando como resultado diferencias en la cristalinidad entre los materiales (Quintero, 2016).

Tabla 4: Características del PET y del rPET

Propiedad	PET virgen	rPET
-----------	------------	------

Módulo de Young [MPa]	1890	1630
Resistencia a la rotura [MPa]	47	24
Elongación a la rotura [%]	3,2	110
Resistencia al impacto [J/m]	12	20
Temperatura de fusión (°C)	244-254	247-253
Peso molecular ($g\ mol^{-1}$)	81600	58400

Fuente: Adaptado de Quintero (2016).

b. Reciclaje químico

El reciclado químico o despolimerización implica principalmente la conversión, rompimiento o reducción de la cadena principal de polímero, en unidades más pequeñas como monómeros y oligómeros (fragmentos de cadena más grandes), además de la generación de subproductos gaseosos. Esto, se puede interpretar como una degradación inducida o provocada en condiciones controladas (temperatura, pH, presión, tiempos de reacción, etc.), mediante un proceso de solvólisis, para alcanzar la despolimerización del PET.

La solvólisis es un procedimiento por el que el disolvente actúa también como reactivo. En función de la naturaleza del disolvente se distinguen distintas clases de solvólisis como la quimiólisis (glicólisis, hidrólisis y metanólisis), en donde se utilizan también fluidos supercríticos.

- **Metanólisis:** La metanólisis es una metodología que implica la degradación del PET, por medio de la adición de metanol a temperaturas (180-280°C) y presiones elevadas (CEDEX, 2013). Este poliéster (el PET), es descompuesto en sus moléculas básicas, incluido el dimetiltereftalato y el etilenglicol, los cuales pueden ser luego re-polimerizados para producir resina virgen.

Las experiencias llevadas a cabo por empresas como Hoechst-Celanese, Eastman y DuPont han demostrado que los monómeros resultantes del reciclado químico son lo suficientemente puros para ser reutilizados en la fabricación de nuevas botellas de PET (Ojeda, 2011b). Sin embargo, presenta una limitante considerable el alto costo de separación y refinamiento de los productos de reacción (glicoles, alcoholes y ftalatos) (Mendez, 2021). En la figura 10, se evidencia el diagrama de bloques del proceso de metanólisis.

concentrado. Sin embargo, el proceso se puede encarecer al tener que reciclar grandes cantidades de ácido además de la purificación del EG (Mendez, 2021).

Esta técnica es fácil de realizar a nivel laboratorio, pero a escala industrial es un proceso que involucra gran cantidad de costos sobre todo en la fase de separación, ya que demanda muchas materias primas que aumentan significativamente el costo de producción y por ende se crea un sobrecosto de los productos muy por encima de los precios del mercado. Además, la hidrólisis ácida incrementa la disolución de impurezas, las que ocasionan procesos posteriores de purificación de los monómeros obtenidos (Ojeda, 2011c).

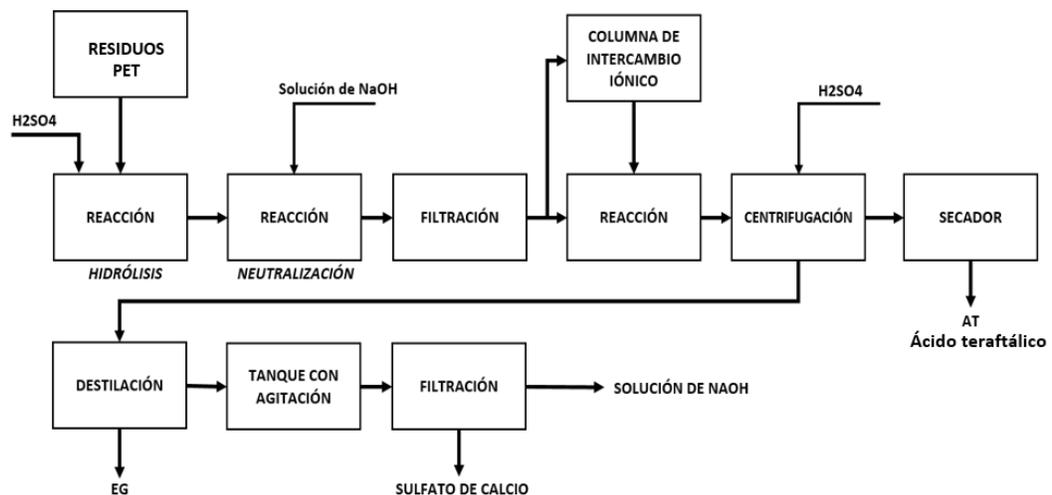


Figura 11: Diagrama de bloques de la Hidrólisis Ácida

Fuente: Ojeda (2011c)

- Hidrólisis neutra:** La hidrólisis neutra se realiza mediante el uso de agua o vapor. A pesar de esto, el pH de la mezcla de reacción posterior asciende a 3.5 – 4. El proceso se lleva a cabo a temperaturas de 200 a 300 °C. Pensando en la búsqueda constante de procesos más sustentables y circulares, sin duda la hidrólisis neutra representa una ventaja por su alta pureza ecológica. Desafortunadamente, presenta el inconveniente de una elevada concentración de impurezas, las cuáles se encuentran presentes en el material recuperado, quedan atrapadas en el TPA, manifestando por ello baja eficiencia y calidad de producto por debajo de los productos obtenidos por hidrólisis ácida o alcalina. Lo cual implica una etapa de purificación de alta eficiencia del TPA (Mendez, 2021).
- Glicólisis:** Despolimerización parcial por acción del etilenglicol. La mezcla obtenida se somete a la polimerización con resina virgen luego de haber sido purificada.



Usualmente las condiciones para realizar la glicólisis son: tiempo de reacción con variación en los rangos de temperatura que van desde 180°C hasta 250°C, en presencia de un catalizador y comúnmente se utiliza relación en peso de 1:2 a 1:3 de PET: Glicol respectivamente. El resultado de una glicólisis exhaustiva son los productos BHET y EG; esta reacción se presenta en la figura 12. Los productos de la despolimerización son el bis(hidroxietil) tereftalato y el etilenglicol (Martínez, s.f.)

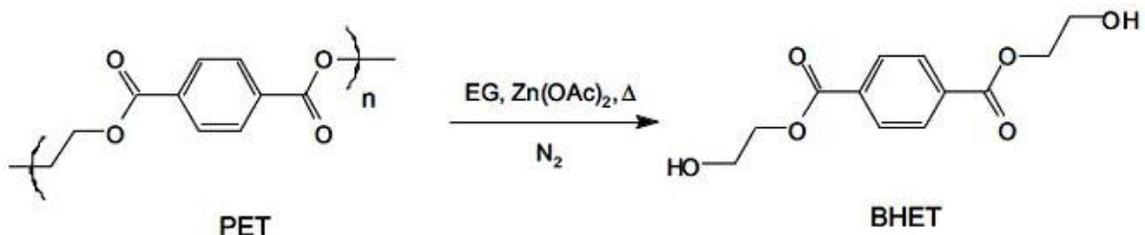


Figura 12: Despolimerización del PET por glicólisis con etilenglicol

Fuente: Elgegren, Mariela, Tiravanti, Giulliana J., Ortiz, Bruno A., Otero, Manuel E., Wagner, Florian, Cerrón, Daniel A., & Nakamatsu, Javier. (2012)

La glicólisis ha podido convertirse en uno de los procedimientos más viables en el reciclado químico, la bondad de este método radica en la baja inversión de capital, siendo diferente a la metanólisis, así como la hidrólisis, que requieren plantas de grandes capacidades para posibilitar su viabilidad (Bardales, et al. 2021).

La metanólisis, la hidrólisis (básica, ácida y neutra), la amonólisis y la glicólisis, son métodos de degradación química en los cuales se obtiene la materia prima para la elaboración de PET aplicable en la elaboración de fibras y prendas de vestir, así como también para la elaboración de nuevos envases de grado alimenticio, además se obtienen otros monómeros útiles para la síntesis de nuevos productos químicos como resinas, la desventaja de estos métodos es que requieren aparatos de alta temperatura y presión, además se consume grandes cantidades de productos químicos para la despolimerización, separación y purificación (Suasnavas, 2017).

En la tabla 5 se resumen algunas de las características de los 3 principales métodos de reciclaje químico para las botellas PET.

Tabla 5: Consolidación de características de principales métodos de reciclaje químico de botellas PET

Aspecto de evaluación	Metanólisis	Glicólisis	Hidrólisis
Agente solvótico	Metanol	EG, DEG, TEG, PG y otros glicoles	Soluciones acuosas de ácidos, bases y agua
Productos derivados	DMT, EG	BHET y diolesoligoméricos (polioles), sirve para poliésteres insaturados, poliuretanos, EG	AT, EG.
Flexibilidad en el uso de varios residuos de PET	Media (acepta PET de menos calidad que la glicólisis)	Media (más conveniente para desechos post-industriales)	Alta (más del 40% de los contaminantes)
Condiciones de degradación	T<300°C P<7MPa	T<280°C Catalizada	Ácida: T<150°C, min. Alcalina: T<250°C 1-4h, 0,1-2MPa Neutra: T<300°C, P<4MPa
Requerimientos de seguridad	Altos	Bajos	Altos
Aspectos económicos (con purificación de productos y conveniencia)	El DMT del PET reciclado es más costoso que el virgen: fácil purificación del DMT	Aceptable para instalaciones medias y pequeñas: no es fácil la purificación	Muy dependiente de la escala, pureza del PET y mercado del producto final: Difícil de purificar el AT
Escala industrial	Grandes instalaciones	Instalaciones pequeñas o medias	Grandes Instalaciones
Aplicaciones	Fabricación de nuevas botellas PET y fibras de poliéster para la elaboración de prendas de vestir	Fabricación de resinas de poliéster insaturado, espumas de poliuretano, y espumas de poliisocianurato, capas de gel, capas de mármol de fundición, accesorios de baño, elementos automotrices.	Los productos de hidrólisis pueden utilizarse para producir PET virgen o pueden convertirse en productos químicos más costosos como el ácido oxálico. Elaboración de fibras de poliéster.

Fuente: Adaptado de Martínez (s.f.) y Suasnavas (2017)

c. Reciclaje térmico

El PET es un polímero que está formado sólo por átomos de carbono, oxígeno e hidrógeno, por lo cual al ser quemado produce sólo dióxido de carbono y agua con desprendimiento de energía.

Es posible aprovechar este material como combustible en los casos donde por costos de acopio y transporte sea inviable algún otro procedimiento de reciclado, para calefacción de asilos, escuelas y otros usos como la fabricación de ladrillos, etc.



Tabla 6: Contenido energético del PET comparado con otros combustibles

Combustible	BTU/g
Poliiolefinas	43.929
Carbón	23.178
PET	22.075
Papel periódico	17.660
Basura húmeda	6.181

Fuente: Carcaño (2009)

A modo de resumen, se presenta en la tabla 7 algunos criterios de los 3 reciclajes más aplicados al aprovechamiento de botellas PET desechadas.

Tabla 7: Comparativo de diferentes tipos de reciclaje

Criterio	Reciclado mecánico	Reciclado químico	Valoración energética
Inversión	Baja	Alta	No hay
Tecnología	Accesible	Alta	No hay
Costos operativos	Bajos	Muy altos	Muy bajos
Uso del producto	Materia prima	Resina virgen	No aplica

Fuente: Carcaño (2009)

Capítulo 4: Recopilación de tratamientos ejercidos sobre la fibra PET para utilización textil

4.1 Descripción de tratamientos

- **Una nueva ruta para la preparación de textiles hidrófobos y antibacterianos utilizando nanocompuestos de grafeno cargados con Ag:**

En esta investigación, Ouadil et al. (2019) buscan contribuir a la mejora de las propiedades hidrófobas y antibacterianas de tejidos PET mediante la preparación de un tejido de poliéster multifuncional recubierto con nanopartículas de grafeno/plata (PET-G/Ag°) utilizando un método de recubrimiento por inmersión simple. Esto, dado que los tejidos PET convencionales, suelen presentar varios inconvenientes relacionados con mala humectabilidad en su superficie y escasa actividad antimicrobiana.

El proceso de preparación del tejido se puede dividir en 3 pasos o secciones que se evidencian en la figura 13:

1. La obtención del PET-GO
2. La obtención del PET-G
3. La obtención del PET-G/Ag°

Se tomó como base una muestra del tejido punto de poliéster con dimensión de 0.1x4cm². Esta muestra fue pretratada con una solución acuosa de amoníaco (3 g/L) y detergente no iónico (2 g/L) por 1 h a la temperatura de 100 °C, se lavó con agua destilada y finalmente se secó en estufa por 4 h a 80 °C.

Ahora bien, para obtener el tejido de poliéster recubierto con GO (PET-GO), la muestra se sumergió en una dispersión acuosa de GO obtenida por la dispersión de 50 mg de óxido de grafito en 50 mL de agua desionizada (1 mg/mL) durante 1 h a temperatura ambiente y luego se secó en estufa durante 1 h a 80 °C. Esto se repitió varias veces para aumentar la cantidad de GO cargado en el tejido de poliéster.

Luego, para preparar tejido de poliéster recubierto con grafeno (PET-G), el tejido PET-GO preparado se sumergió en un baño de reducción que contenía una solución acuosa de Na₂S₂O₄ a 50,103 M durante 1 hora a 95 °C. Después de la reducción química, el PET-G obtenido se lavó con agua destilada y se secó durante 1 h a 80 °C.

Después, la tela de PET-G se sumergió en una solución acuosa de AgNO₃ (0,05 mol/L) y se ultrasonizó durante 30 min. Luego, el tejido de poliéster húmedo se introdujo en una solución acuosa de N₂H₄ a temperatura ambiente durante 10 min para preparar tejido de



poliéster recubierto con nanocompuesto G/Ag^o (PET-G/Ag^o); y por último, el tejido PET-G/Ag^o resultante se lavó con agua destilada y se secó a 80 °C.

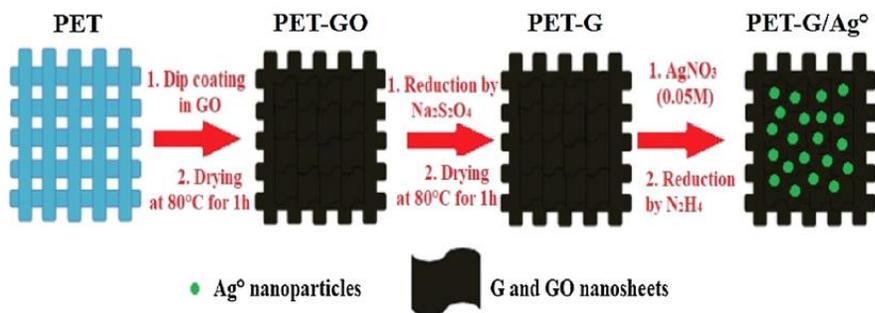


Figura 13: Proceso de preparación del PET-G/Ag^o

Fuente: Ouadil et al. (2019)

Finalmente, este proceso de preparación del PET-G/Ag^o dio como resultado un tejido con mejora significativa en la hidrofobicidad, mayor estabilidad térmica, excelente actividad antibacteriana y una casi nula afectación en sus propiedades mecánicas.

- **Híbridos Cu₂O@TM con alta carga de metal para fibras antibacterianas hiladas por fusión diseñadas para tejidos de protección médica:**

En este trabajo, Zhou, Zhai et al. (2022) proponen un híbrido de Óxido de cobre y Turmalina Cu₂O@TM con alta carga de metal para la producción de fibras antibacterianas. El proceso de preparación del híbrido Cu₂O@TM incluye principalmente activación, silanización, carboxilación, quelación de iones de cobre y reducción tal y como se refleja en la figura 14.

El proceso de activación utilizó principalmente peróxido de hidrógeno para tratar el TM a 100 °C durante 6 h para activar los grupos en su superficie. Luego, el proceso de silanización, el cual consiste principalmente en la reacción de injerto de TM activado disperso en una mezcla de ciclohexano y n-propilamina con KH570 para organizar la superficie.

El proceso de carboxilación consiste principalmente en dispersar el TM injertado con el agente de acoplamiento de silano (TM/KH570) en un tubo de irradiación que contiene una solución mixta de ácido acrílico (AA) y agua (el % en volumen de AA no supera el 2 %). Después de la dispersión ultrasónica y la desoxigenación, se injertó AA bajo irradiación con fuente de cobalto (dosis absorbente de 20 kGy) para preparar TM modificado carboxilado (TM/AA). Esta operación es particularmente importante para este trabajo y es un paso clave en la preparación de híbridos Cu₂O@TM con altas cargas de metal.

La quelación y reducción de iones de cobre son procedimientos de rutina. La quelación se realiza quelando por Cu^{2+} en una solución de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; mientras que la reducción a Cu_2O se realiza bajo la acción de NaOH (1,5 M) y ácido ascórbico (0,1 M). Finalmente, el híbrido $\text{Cu}_2\text{O@TM}$ se obtuvo tras centrifugación en gradiente y secado al vacío.

La resina compuesta PET/ $\text{Cu}_2\text{O@TM}$ se preparó mediante polimerización in situ. Durante la polimerización de PET, $\text{Cu}_2\text{O@TM}$ se dispersó en etilenglicol y se agregó al sistema de polimerización para obtener resinas compuestas con diferentes contenidos de $\text{Cu}_2\text{O@TM}$. Luego se procesa en fibras hiladas por fusión.

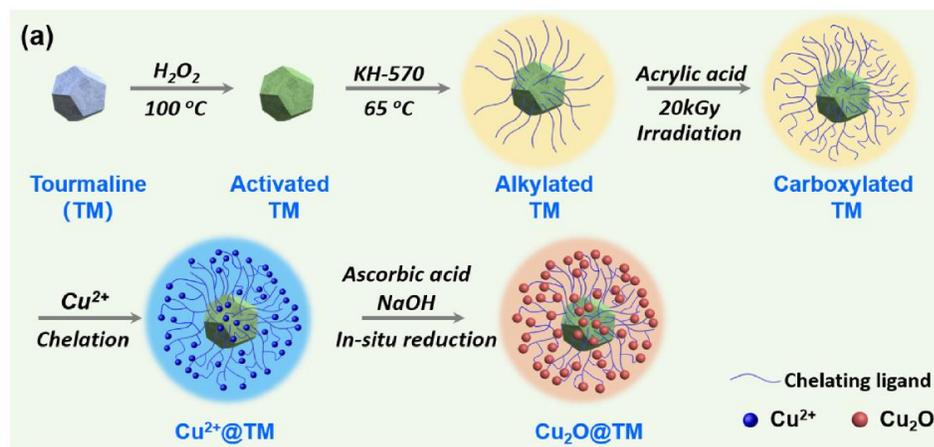


Figura 14: Diagrama esquemático de la preparación de $\text{Cu}_2\text{O@TM}$

Fuente: Zhou, Zhai et al. (2022)

A través de la caracterización de las fibras se logró identificar la importancia del ácido acrílico para aumentar la carga de Cu_2O . Además, en cuanto a actividad antibacteriana, el híbrido $\text{Cu}_2\text{O@TM}$ presenta un excelente desempeño, siendo esto atribuido totalmente al Cu_2O .

- **Fabricación de tejidos de PET superhidrófobos, robustos y autorreparables basados en estructura de fibra perfilada**

En este documento, Zhou, Zhang et al. (2020) informan sobre una estrategia de fabricación de tejidos de poliéster superhidrófobos robustos y autorregenerables basados en la estructura de fibra perfilada o TSP-PET. En esta estrategia, se eligió como sustrato el tejido que consistía en fibras de tereftalato de polietileno (TSP-PET) perfiladas con segmentos de mandarina y se sintetizó la solución de TiO_2 modificado para recubrir el tejido. En la figura 15 se ilustra la estrategia para la preparación del tejido TSP-PET



superhidrófobo. En ella podemos evidenciar que el TiO_2 modificado y el tejido TSP-PET fueron pre-tratados.

Por un lado, para obtener el TiO_2 modificado, primero se obtuvo una solución de TiO_2 mediante la hidrólisis de TBT (Titanato de Tetrabutilo), la cual luego, fue modificada por DTMS (Dodeciltrimetoxisilano) el cual se hidrolizó y reaccionó con el hidroxilo presente en la solución de TiO_2 para formar una emulsión hidrofóbica estable. Este paso es fundamental para aportar propiedades hidrófobas al tejido.

Simultáneamente, el tejido TSP-PET se pretrató con LTP (plasma de baja temperatura) en una atmósfera de oxígeno para crear hoyos y microporos y producir carboxilo en la superficie de las fibras de PET. Con este paso, se busca beneficiar la formación de micro y nanoestructuras jerárquicas e incrementar la estabilidad estructural de la superficie.

Por último, una vez pre-tratados la solución de TiO_2 y el tejido TSP-PET; este último se somete a un proceso de curado y recubrimiento por inmersión en un solo paso. Durante el proceso, la solución de DTMS- TiO_2 estableció un enlace químico estable con la superficie de las fibras, y la estructura micro-nano jerárquica también se construyó en la superficie de las telas.

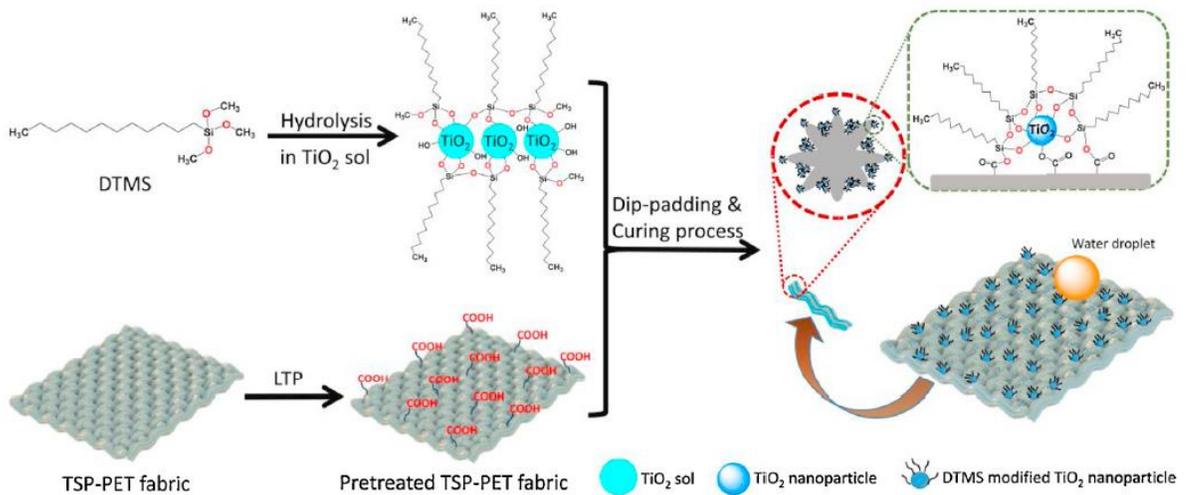


Figura 15: Ilustración esquemática de la estrategia para la preparación de tejido TSP-PET superhidrófobo.

Fuente: Zhou, Zhang et al. (2020)

A través de la caracterización del tejido, se logró confirmar la existencia de propiedades superhidrófobas, durabilidad de lavado y gran resistencia a las erosiones químicas e irradiación UV así como a la abrasión. Por último, y uno de los resultados más importantes

es la capacidad de autorreparación por calor, o incluso a temperatura ambiente con el paso de las horas.

- **Preparación de fibras de tereftalato de polietileno colorantes, ignífugas y antigoteo a base de tintura de clorofila de cobre sódico natural e intercalación de éster de ácido graso de sacarosa fosforilada:**

En este trabajo, realizado por Liu, Zhao et al. (2022) Se propone el desarrollo de fibras PET teñidas, multifuncionales, ignífugas y antigoteo.

Primero, para obtener fibras de PET teñidas (DY-PET) se fijó clorofila de cobre y sodio (SCC) en la superficie de las fibras de PET a través de un proceso de teñido. Además, para mejorar aún más la resistencia a la llama del DY-PET, el tejido se intercaló con el retardante de llama fosfato de amonio de éster de ácido graso de sacarosa (APSFA), el cual se sintetizó mediante la fosforilación del éster de ácido graso de sacarosa, dando como resultado fibras PET teñidas, ignífugas y antigoteo (FR-PET).

Para empezar, la preparación del fosfato de amonio de éster de ácido graso de sacarosa (APSFA) se llevó a cabo mezclando SFA y agua desionizada en un matraz equipado con agitación mecánica y condensador de reflujo, y luego se calentó a 120 °C en baño de aceite hasta que el SFA se disolvió por completo. Luego, se añadió ácido fosfórico, aumentando la temperatura 160°C por 3 horas y solución de urea por 2 horas más. Después de eso, se dejó de calentar y se mantuvo la agitación hasta que el sólido suave en el matraz se transformó en líquido. Por último, la solución se filtró y se destiló al vacío obteniendo como resultado un líquido naranja el cual vendría a ser APSFA.

Por otro lado, la preparación de las fibras teñidas DY-PET empezó con la eliminación de impurezas adheridas a las fibras y su posterior purificación con ayuda de etanol y una solución acuosa de NaOH respectivamente. Luego de ser tratadas, estas fueron lavadas con agua desionizada y secadas. Posteriormente, las fibras de PET se colocaron en la solución acuosa de teñido mixto que contenía SCC y NaCl bajo unas condiciones determinadas. Después, las fibras se sacaron, se exprimieron y se secaron; para luego ser enjuagadas con agua desionizada para eliminar el color flotante en la superficie de la fibra y luego secadas de nuevo. En la figura 16 se ilustra el proceso de preparación de DY-PET.

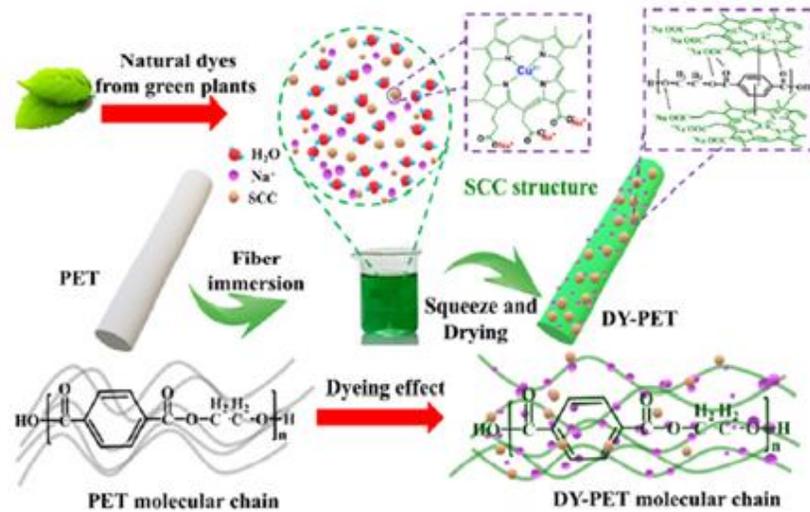


Figura 16: Proceso de preparación de DY-PET

Fuente: Liu, Zhao et al. (2022)

Por último, la preparación de FR-PET consistió en tomar las fibras de DY-PET y empaparlas en APSFA a 120 °C durante 2 h. Luego, exprimirlas, enfriarlas a temperatura ambiente durante 30 min y por último, secarlas a 60 °C durante 12 h. En la figura 17 se presentan imágenes de la FR-PET obtenida y los productos derivados de la misma.

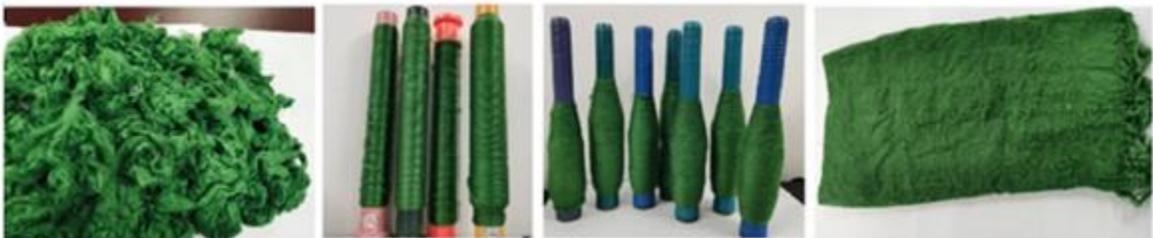


Figura 17: Fibra FR-PET y sus productos derivados

Fuente: Liu, Zhao et al. (2022)

A través de la caracterización de las fibras se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Las fibras DY-PET y FR-PET presentaron un aumento significativo del peso del carbón residual, el cual actúa como una barrera para cubrir la superficie de la fibra y jugar un efecto ignífugo. También, presentaron una mejora de la estabilidad térmica y excelente resistencia a la decoloración.

Además, en cuanto al FR-PET, su índice limitante de oxígeno aumentó y se encontró que este tejido produce menos gases de combustión y más gases no combustibles diluyendo

la concentración de oxígeno y gases de combustión mejorando de esta manera las propiedades ignífugas ya obtenidas en la fibra DY-PET.

- **Procesamiento ignífero de fluido supercrítico de fibra de tereftalato de polietileno (PET) tratada con 9,10-dihidro-9-oxa-10-fosfafenantreno-10-óxido (DOPO): Cambios en las propiedades físicas y desempeño ignífero**

En busca de un proceso de producción amigable con el medio ambiente, para la obtención de fibras PET con propiedades ignífugas; Oh, Kim et al. (2021) proponen en este artículo investigativo la aplicación de 9,10-dihidro-9-oxa-10-fosfafenantreno-10-óxido (DOPO) a las fibras PET con la utilización de CO₂ supercrítico como solvente.

El método de aplicación inicia enrollando la fibra de PET en el cilindro del dispositivo y se agrega DOPO en concentraciones de 1, 3, 5, 7 y 9% o.w.f., de acuerdo con el peso de la fibra. Una vez el recipiente se sella completamente, se enfría rápidamente en un congelador durante 15 min para facilitar la inyección de gas CO₂ y luego se recupera para inyectar gas CO₂. Una vez completada la inyección, el dispositivo del recipiente se coloca en un baño de aceite y la temperatura se incrementa a razón de 2 °C/min a 20–90 °C y 1 °C/min a 90–120 °C, y luego se mantiene a 120 °C y 25 MPa durante 60 min. Posteriormente, se disminuye la temperatura a 60 °C a razón de 2 °C/min, tras lo cual se retira el dispositivo del recipiente del baño de aceite y se elimina el gas CO₂. Por último, se recupera la muestra del interior del cilindro, se sumerge en etanol, se lava con agua durante un minuto y se seca a temperatura ambiente durante 24 h. En la figura 18 se presenta un esquema ilustrativo del proceso de aplicación de DOPO a la fibra PET.

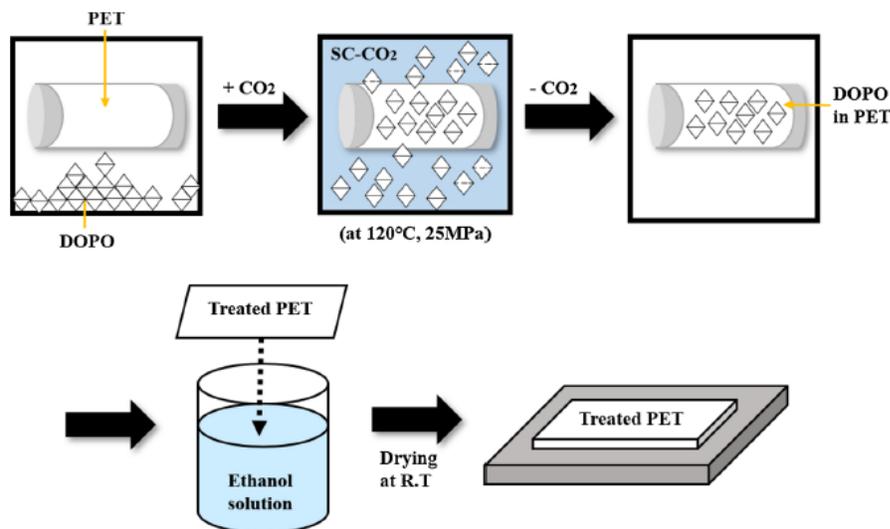


Figura 18: Esquema del mecanismo de procesamiento con CO₂ supercrítico de fibras PET ignífugas utilizando DOPO

Fuente: Oh, Kim et al. (2021)



La caracterización realizada al desempeño de las fibras PET tratadas con DOPO a diferentes concentraciones permitió identificar que: Las fibras PET tratadas presentaron excelente durabilidad de lavado y sus propiedades mecánicas no se vieron afectadas significativamente. Además, a medida que aumentaba la concentración de DOPO, la distancia de carbonización y el tiempo luego de llama de las fibras tratadas disminuían, las tasas de pérdida de peso de las fibras disminuían y eran más estables, y la rugosidad de la superficie aumentaba.

- **Nanocompuesto de óxido de grafeno/SnO₂ reducido en superficie de PET: Síntesis, caracterización y aplicación como textil bloqueador de rayos ultravioleta y electroconductor**

En este artículo investigativo, Babaahmadi & Montazer (2016) describen un nuevo enfoque para desarrollar una estructura electro-conductora y de bloqueo ultravioleta en la superficie del tejido PET, mediante la aplicación de un nanocompuesto de óxido de grafeno y óxido de estaño (rGO/SnO₂).

El desarrollo de este método se puede dividir en dos pasos: primero, la preparación de las soluciones de óxido de grafeno. Segundo, la síntesis y aplicación de la nanoestructura de rGO/SnO₂ en el tejido PET.

En cuanto a la preparación de las soluciones de óxido de grafeno, se dio inicio con la agitación de 1 g de grafito, 0,5 g de NaNO₃ y 23 ml de H₂SO₄ en un matraz a 0 °C durante 30 min. Luego, se agregó lentamente a la mezcla 3 g de KMnO₄ y se mantuvo a 35 °C durante 30 min. Después, se añadieron 46 mL de agua desionizada a la mezcla aumentando la temperatura hasta 98 °C y manteniéndola durante 15 min. El color cambió a marrón y luego la mezcla se enfrió usando un baño de agua dentro de 15 min. En el último paso se añadió a la mezcla 1 mL de H₂O₂ (30%) en 140 mL de agua desionizada para mejorar la oxidación. El lavado y la purificación se realizaron en diferentes pasos con agua desionizada y HCl (37%) y luego se centrifugaron a 4000 rpm. El producto final se secó a temperatura ambiente durante 48 h y se mantuvo en estufa a 60 °C durante 30 min para eliminar el exceso de agua sobre la estructura. Las soluciones de GO con diferentes concentraciones se prepararon mediante tratamiento ultrasónico a temperatura ambiente. Se añadió la cantidad deseada de polvos de óxido de grafito al agua desionizada y la mezcla se mantuvo bajo ultrasonidos durante 60 min.

Ahora bien, en cuanto a la síntesis y aplicación de la nanoestructura de rGO/SnO₂ en el tejido PET, 1g de estos se trataron con 100 ml de soluciones precursoras (GO: 0,01, 0,05, 0,10 y 0,15 %) y se secaron para la carga de rGO. La reducción de las láminas de GO se llevó a cabo mediante un tratamiento con diferentes SnCl₂ (0,01, 0,05, 0,10 y 0,15 %).

Finalmente, las muestras reducidas se secaron y curaron a 200°C por 30 min. Los detalles de las condiciones aplicadas se muestran en la Figura 18. Finalmente, todas las muestras se lavaron con agua desionizada (10 veces) para evaluar la durabilidad de las nanoestructuras en la superficie.

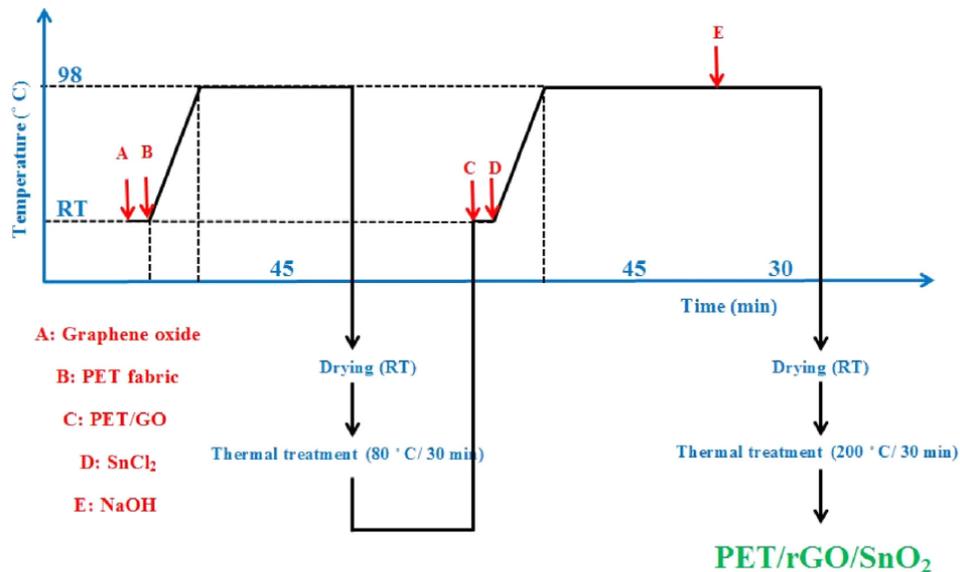


Figura 18: Condiciones aplicadas y paso a paso de la síntesis de rGO/SnO₂ en el tejido PET.

Fuente: Babaahmadi & Montazer (2016)

A través de las diferentes técnicas utilizadas para caracterizar las muestras, se identificó que: Al incrementar el agente reductor (SnCl₂), la resistividad eléctrica disminuye y sucesivos lavados no afectan significativamente dicha resistividad; El factor de protección ultravioleta (UPF) aumentó de 183,4 puntos una vez aplicada la estructura rGO/SnO₂; El rGO absorbió los rayos UV de manera eficiente, incluso, después de 10 lavados.

- **Textiles superhidrófobos resistentes a los rayos UV con propiedades de protección UV mediante la introducción de nanotubos de núcleo/cubierta de ZnO/SiO₂ en fibras de PET e hidrofobización**

En este artículo de investigación, Xue, Yin et al. (2013), proponen el crecimiento de nanoestructuras de ZnO cubiertas por SiO₂ en fibras PET con un posterior proceso de hidrofobización para obtener como producto final, textiles a base de fibras PET que sean superhidrófobos y con propiedades de protección UV.

El método de aplicación consiste primeramente en la síntesis de las semillas de nanopartículas de ZnO. Este se llevó a cabo mediante la preparación de una solución de Zn (CH₃COO)₂ 0,087 mM en 2-propanol a 10 °C, a la cual luego se añadieron gota a gota 20 ml de hidróxido de sodio 20 mM en 2-propanol a la solución fría con agitación continua.



Luego, la mezcla se mantuvo en un baño de agua con temperatura controlada a 60 °C durante 2 h para preparar las semillas de nanopartículas de ZnO.

La segunda etapa consiste en el crecimiento de las semillas de ZnO por tratamiento hidrotérmico. Los tejidos se pretrataron con NaOH al 20 % durante 2 min a 100 °C para obtener PET hidrolizado. Luego, se sembraron sumergiendo el PET hidrolizado en la solución de semillas de nanopartículas de ZnO durante 15 minutos, luego se secaron y calentaron a 80 °C durante 20 minutos para garantizar que las semillas se adhirieran de manera segura (este proceso se repitió tres veces). Las nanoestructuras de ZnO se cultivaron en un matraz cónico sellado que contenía una solución equimolar de Zn (NO₃)₂·6H₂O y C₆H₁₂N₄ a 93 °C con oscilación continua durante 3 h (se usaron diferentes concentraciones de la solución precursora).

Luego, se llevó a cabo un método de deposición capa por capa para recubrir las nanopartículas de ZnO con sílice. En primer lugar, se modificó la nanoestructura de ZnO de forma que fuera rica en polielectrolitos; esto se hizo mediante el sumergimiento intercalado entre una solución acuosa de Poli(4-estirenosulfonato de sodio) (1 g L⁻¹, que contenía NaCl 0,5 M) durante 10 min, agua, solución acuosa de Cloruro de poli(dialildimetilamonio) PDDA (1 g L⁻¹, que contenía NaCl 0,5 M) durante otros 10 min y de nuevo agua (esto se repitió 4 veces). Después, se formó una bicapa de PDDA/sílice sumergiendo el textil alternativamente en soluciones acuosas de PDDA (1 g L⁻¹, que contenía NaCl 0,5 M) y soluciones de silicato de sodio (40 mM, pH 7,5) durante 10 min con lavado intermedio con agua (esto se repitió 3 veces). El ZnO recubierto de múltiples capas se horneó a 150 °C durante 2 h para formar una capa densa de SiO₂ en la superficie de ZnO.

Para la última etapa correspondiente a la hidrofobización, los textiles se sumergieron en una solución de etanol-HDTMS (1% en peso) y se hicieron reaccionar durante 20 minutos a temperatura ambiente. El exceso de solución de HDTMS sobre las fibras se eliminó con un padder. Luego los textiles de PET se secaron al aire a 80 °C por 10 min 3 veces. Finalmente, los textiles se hornearon a 170 °C durante 5 min. El proceso completo del proceso se resume en la figura 19.

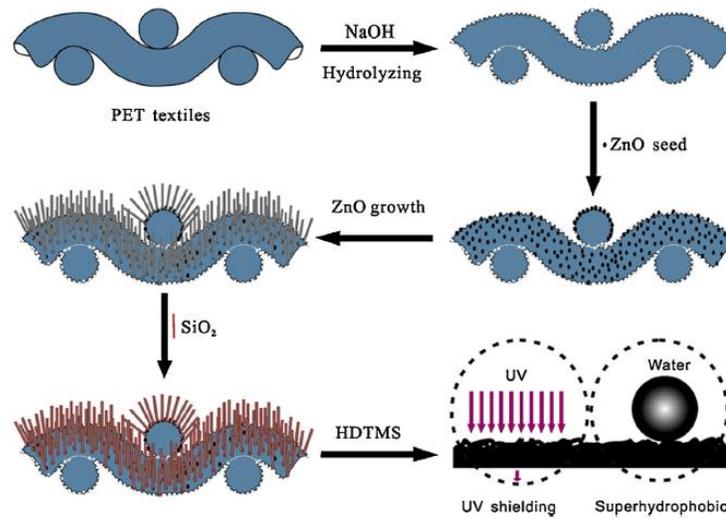


Figura 19: Ilustración de la fabricación de textiles de PET superhidrófobos con propiedades de protección UV

Fuente: Xue, Yin et al. (2013)

Dentro de las principales propiedades adquiridas por los tejidos tratados con este método se encuentran: excelente superhidrofobicidad, protección contra rayos UV y UV-durabilidad de la superhidrofobicidad.

- **Híbridos micro-nano Cu₂O@OZrP de alta estabilidad térmica para fibras de poliéster hiladas por fusión con excelente actividad antibacteriana**

En este trabajo realizado por Zhou, Wang et al., se propone la síntesis de un micro-nano híbrido compuesto por Cu₂O y OZrP para su utilización en el hilado por fusión de fibras PET con propiedades antibacterianas.

Se cargó OTP (Bromuro de octadecilo trifenilfosfonio) en la superficie interna de las nanoláminas de ZrP a través de la intercalación de intercambio iónico, y se cargó Cu₂O de tamaño nanométrico en la superficie externa de las nanoláminas de ZrP a través de reducción química in situ para preparar materiales híbridos micro-nano de Cu₂O@OZrP. La representación esquemática de este proceso se encuentra en la figura 20.

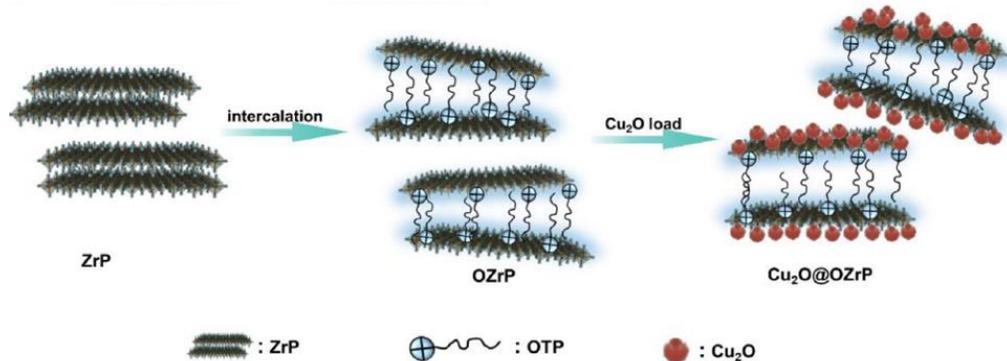


Figura 20: Ilustración esquemática del procedimiento de síntesis de las nanolaminas $\text{Cu}_2\text{O}@\text{OZrP}$

Fuente: Zhou, Wang et al. (2021)

El fosfato de circonio modificado con OTP (OZrP) se preparó por intercalación. Para iniciar, se dispersaron 2 g de ZrP en 200 ml de solución de etanol ($V(\text{etanol})/V(\text{agua}) = 4:1$), y se agitaron mediante ultrasonidos a temperatura ambiente durante 30 min. Luego, se agregaron lentamente 0,5 g de n-propilamina (PA) a la solución mixta y la reacción se mantuvo a 60 °C durante 1 h. Después de eso, se agregaron 2 g de OTP a la solución mixta y la reacción se agitó por completo durante 6 h a 60 °C. Finalmente, los productos de reacción se separaron por centrifugación. Después de la primera separación, los productos se dispersaron en solución acuosa de etanol y se agitaron a 60 °C durante 15 min para eliminar el exceso de OTP. Los productos se secaron durante 24 h en un horno de vacío a 60 °C. Después de moler completamente, los productos se colocaron en un horno tubular a 300 °C y se trataron en una atmósfera de N_2 durante 5 min para eliminar PA, y se obtuvo una alta estabilidad térmica de OZrP. Ahora bien, para preparar las nanolaminas $\text{Cu}_2\text{O}@\text{OZrP}$, se dispersaron 2 g de OZrP en 200 ml de solución de etanol ($V(\text{etanol})/V(\text{agua}) = 4:1$) con fuerte agitación y ultrasonificación durante 30 min a temperatura ambiente. A continuación, se añadieron lentamente al sistema 0,006 mol de EDTA y se agitó durante 3 horas a 40 °C. Posteriormente se añadieron 0,025 mol de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y se agitó durante 30 min a 40 °C. Se dejó caer una solución de NaOH 0,15 mol en el sistema de reacción. Luego, se agregó una solución de ácido ascórbico 0,0075 mol para reducir los iones de cobre in situ para producir Cu_2O . Para finalizar, las nanolaminas de $\text{Cu}_2\text{O}@\text{OZrP}$ se obtuvieron por separación centrífuga, se lavaron con agua destilada y se secaron al vacío a 60 °C.

En cuanto a la preparación de las fibras PET/ $\text{Cu}_2\text{O}@\text{OZrP}$; se inició secando la resina de PET a 160 °C durante 24 h al vacío y luego se mezcló homogéneamente con $\text{Cu}_2\text{O}@\text{OZrP}$ en diferentes contenidos mediante un tornillo extrusor doble a 255 °C. Las resinas PET y PET/ $\text{Cu}_2\text{O}@\text{OZrP}$ se precrystalizaron a 90 °C durante 3 h y se secaron a 130 °C durante 36

h. Luego, las fibras de PET y PET/Cu₂O@OZrP se hilaron por fusión a 265– 280 °C y 3200 m/min y por último fueron estiradas.

Las fibras resultantes de este proceso presentaron una tasa antibacteriana del 99% contra superbacterias y sus propiedades mecánicas no se vieron afectadas significativamente, sino que por el contrario, mejoraron, aunque en un bajo porcentaje. Además, se encontró que el Cu₂O@OZrP presenta débil citotoxicidad y excelente estabilidad térmica.

- **Calentadores de accionamiento dual electrotérmico/fototérmico flexibles y estirables a partir de telas de PET recubiertas de CuxS jerárquicas nanoincrustadas para la gestión térmica portátil para todo tipo de clima**

En este trabajo realizado por Zhang, Liu et al. (2022), se fabrican calefactores duales electrotérmicos/fototérmicos flexibles y estirables a partir de telas de PET recubiertas de CuxS jerárquicas nanoincrustadas para la gestión térmica portátil para todo tipo de clima. Esto se lleva a cabo mediante dos pasos principales: la preparación de la plantilla N y la preparación del tejido CuxS@PET.

La plantilla N cumple la función de promover y facilitar el crecimiento de CuxS. Para ello, primero se pretrató la tela PET sumergiéndola en una solución acuosa de hidróxido de sodio durante 60 min a 80 °C de forma que se produjeran muchos grupos que contienen oxígeno, como OH, COOH y epox en su superficie. Luego, se lavó con etanol y agua desionizada. Ahora bien, la plantilla N se preparó independientemente con un derivado de aziridina trifuncional para reticularse en la superficie de los tejidos PET pretratados.

Por último, las telas de PET modificadas se colocaron en un matraz que contenía la solución acuosa de reticulante de aziridina (1%, 100 ml). La reacción se llevó a cabo en un baño de agua con termostato vibrador a 80 °C durante 3 h, seguido de secado a 60 °C durante 8 h. De esta forma, los derivados de aziridina trifuncionales se entrecruzaron como plantilla N para el crecimiento de CuxS en la superficie modificada de las telas de PET.

Luego, el CuxS se depositó mediante un método de baño químico simple en la plantilla N anterior, es decir, las telas de PET modificadas con aziridina. Primero se preparó la solución mixta de CuSO₄·5H₂O (0.09 M) y Na₂S₂O₃·5H₂O (0.09 M), seguido de la adición de solución de ácido cítrico (3 mL). Posteriormente, las telas de PET preparadas con plantilla N se sumergieron en la solución mixta anterior a 95 °C bajo vibración constante durante 3 h. Luego, los productos se lavaron con agua destilada y etanol. Al secarse a 60 °C durante 12 h, se obtuvieron los tejidos CuxS@PET.

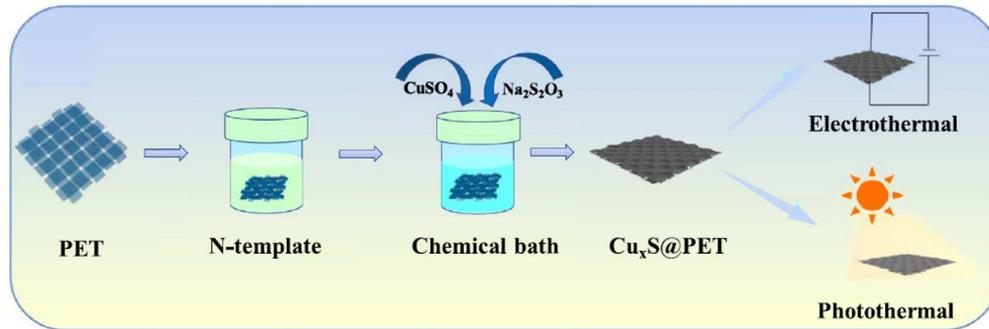


Figura 21. Proceso de fabricación de la película Cu_xS jerárquica sobre el tejido aislante PET

Fuente: Zhang, Liu et al. (2022)

Este método, le concedió al tejido PET excelente estabilidad térmica, reproducibilidad, estirabilidad, controlabilidad y resistencia a la corrosión. Su excelente rendimiento de conversión térmica se logró intercambiando libremente la fuente de energía impulsora, desde un equipo de suministro de electricidad, láser de 635 nm, lámpara de fisioterapia infrarroja, hasta un simulador solar.

- **Recubrimiento ignífugo y antigoteo para tejido PET con fosforamida cíclica que contiene hidroxilo**

En este trabajo investigativo, Zhang, Zhang et al. (2021) prepararon una tela antigoteo ignífuga a través de la síntesis y recubrimiento del tejido PET con DPHP mediante dip-coating.

En este proceso, se sintetizó cloruro de fosforilo de 2,2-dimetil-1,3-propanodiol (DPPC) mediante la reacción de cloruro de fósforo y neopentilglicol. Primero, se dispersó neopentilglicol (0,3 mol, 31,24 g) en 150 ml de diclorometano en un matraz de vidrio de tres bocas de 500 ml con condensador circular y termómetro. Después de enfriar a 0 ~ 5 °C, se añadió gota a gota cloruro de fósforo (0,33 mol, 46,00 g) al matraz bajo un baño de hielo durante 1 h. Luego se aumentó la temperatura a 50 ~ 55 °C y la mezcla se agitó durante 4 h hasta que no se generó HCl. Una vez completada la reacción, la mezcla se enfrió a temperatura ambiente. El diclorometano y el cloruro de fósforo sin reaccionar se evaporaron a presión reducida para obtener un producto en polvo blanco. El producto bruto se lavó con n-hexano y se obtuvo DPPC después de la filtración. Luego, se disolvió DPPC (0,3 mol, 55,2 g) en un matraz de tres bocas de 500 ml que contenía 150 ml de THF y la temperatura se mantuvo entre 0 y 5 °C. Trietilamina (0,3 mol, 30,36 g) y 2-hidroxi-etilamina (0,3 mol, 18,32 g) disueltas en 50 ml de THF y añadidas gota a gota a la solución anterior durante 1 h. Después de completar la adición, la mezcla se calentó a temperatura ambiente y se agitó durante 12 horas. El clorhidrato de trietilamina producido se eliminó por filtración

y el producto oleoso amarillo (DPHP) se obtuvo por evaporación del disolvente con un rendimiento del 91%. La ruta de síntesis de muestra en la figura 22.

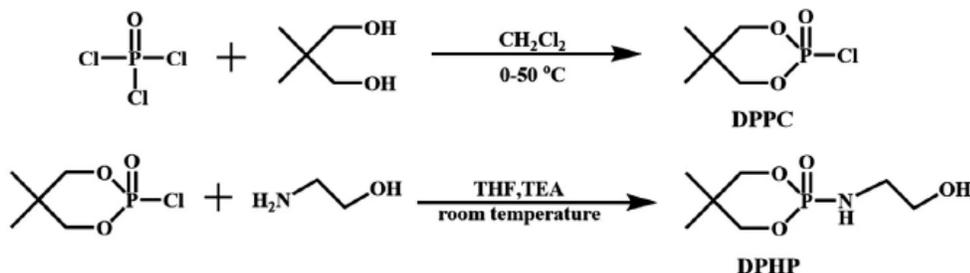


Figura 22: Rutas de síntesis de DPHP

Fuente: Zhang, Zhang et al. (2021)

Antes de recubrir la tela PET, esta se lavó con agua desionizada durante 10 min. Después de secar durante 30 min a 80 °C, se midió el peso seco del tejido de PET. El tejido de PET ignífugo (ya recubierto) se preparó mediante un simple proceso de recubrimiento por inmersión. En detalle, se prepararon diferentes concentraciones de DPHP en agua y se ajustó el valor de pH a 5 con una solución diluida de ácido clorhídrico. La tela de PET se sumergió en la solución de acabado durante 10 min a través de dos inmersiones y dos pinzamientos con un 100 % de recogida. Después de secar a 80 °C durante 30 min, se determinó el peso de la tela de PET recubierta con DPHP. Los tejidos tratados con diferentes concentraciones de DPHP (10%, 15%, 20%, 25%, 30%) fueron etiquetados como PET-DPHP-1, PET-DPHP-2, PET-DPHP-3, PET-DPHP-4 y PET-DPHP-5.

Se encontró que el recubrimiento DPHP puede mejorar la formación de una capa protectora de carbón para PET, lo que dota a las telas de una excelente resistencia a la llama y comportamiento antigoteo. Con el aumento continuo del contenido de DPHP, el LOI se incrementó a 27,6 % y la longitud dañada fue de solo 7,9 cm. Además, el recubrimiento DPHP tuvo poco efecto negativo sobre las propiedades físicas y mecánicas de los tejidos de PET.

- **Telas conductoras de Ni/PPy/PET flexibles, transpirables y altamente estables para el medio ambiente para un blindaje eficiente contra interferencias electromagnéticas y antenas textiles portátiles**

En este trabajo realizado por Liu, Yi et al. (2021), se prepararon con éxito tejidos de Ni/PPy/PET flexibles, ligeros, transpirables y conductores con alta eficacia de blindaje electromagnético mediante polimerización in situ de pirrol y posterior niquelado no electrolítico. Se utilizaron dos tipos de tejidos como sustratos de tejido conductor para estudios comparativos: WK-PET y NW-PET.



Primero, para llevar a cabo la fabricación de los tejidos PPy/PET, se limpiaron las telas WK-PET y NW-PET ultrasónicamente en acetona durante 30 minutos para eliminar cualquier grasa residual e impurezas. Luego, 1 g de Antraquinona-2-sulfonato de sodio (AQS) y 1,2 g de Pirrol (Py) se disolvieron en 100 mL de agua desionizada para formar una solución A. Posteriormente, se agregaron 1,68 g de nitrato férrico nonahidrato y 1,08 g de ácido 5-sulfosalicílico a 100 mL de agua desionizada para preparar la solución B. Después de eso, la tela se sumergió en la solución A y todo el sistema se agitó completamente en un baño de hielo. Luego, la solución B se incorporó lentamente (aproximadamente 1 gota/2 s) en la solución A que contenía el tejido hasta que se añadió todo. Esta polimerización por oxidación in situ del pirrol sobre la superficie del tejido duró 2 h, manteniendo la temperatura de reacción a 0 °C. Finalmente, la tela preparada se lavó varias veces con agua y etanol y se secó al aire para obtener la tela conductora de PPy/PET.

Después, para elaborar la multicapa Ni/PPy/PET, la tela PPy/PET preparada anteriormente se sometió luego a un proceso de sensibilización (3 min a temperatura ambiente), activación (5 min a temperatura ambiente) y recubrimiento no electrolítico (2 h a 60 °C). En concreto, la solución sensibilizadora fue una solución ácida de SnCl₂ con una concentración de 40 g/L, y la solución de activación fue una solución ácida de PdCl₂ con una concentración de 0,8 g/L. La solución de metalizado no electrolítico era una solución acuosa de Ni₂SO₄ (70 g/l), NaH₂PO₂ (60 g/l), Na₃C₆H₅O₇ (40 g/l) y NH₄Cl (40 g/l). Finalmente, la tela conductora obtenida se lavó repetidamente varias veces con etanol y agua y se secó a 60 °C durante 1 h. El esquema del proceso completo se evidencia en la figura 23.

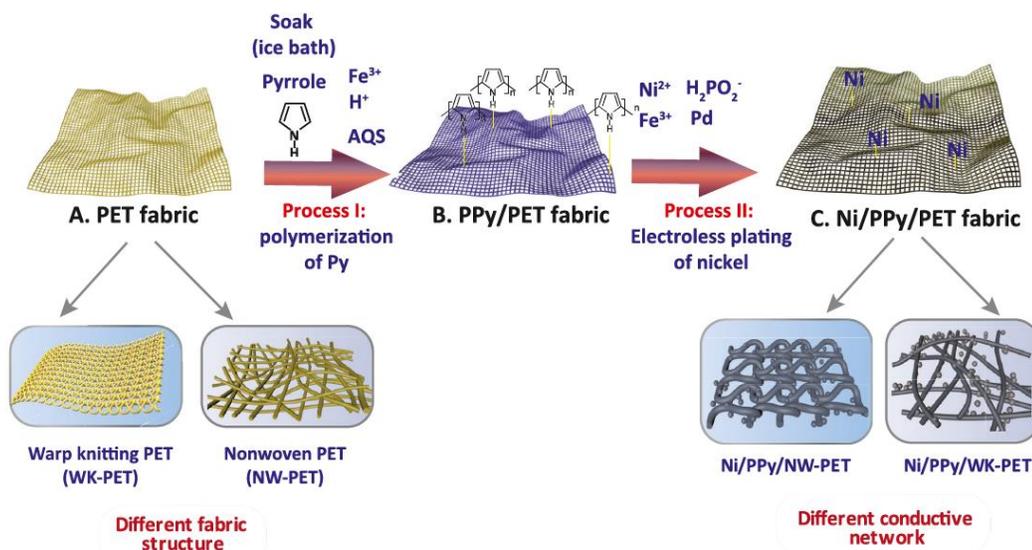


Figura 23: Esquema del proceso de preparación de los tejidos conductores multicapa de Ni/PPy/PET.

Fuente: Liu, Yi et al. (2021)

Dentro de los resultados obtenidos en este trabajo, se encuentra que el tejido Ni/PPy/NW-PET presenta una mayor conductividad y eficacia del blindaje contra interferencias electromagnéticas (EMI) que el tejido Ni/PPy/WK-PET; además de una excelente capacidad de flexión, estabilidad al calor y la humedad y buena capacidad de lavado.

Dentro de las conclusiones más importantes a las que se llegó en este trabajo, es la fuerte relación entre la dimensión fractal del tejido con una conductividad más alta y una eficacia de blindaje EMI superior.

- **Tejido de PET tratado con compuestos a base de fósforo respetuosos con el medio ambiente para mejorar la resistencia al fuego, la estabilidad térmica y el rendimiento antigoteo**

Ding, Zhang et al. (2022) proponen la elaboración de un sistema ignífugo de tres elementos de P-N-Si para la aplicación superficial en tejido PET mediante un método de curado en seco.

Para ello, se inicia con la preparación de ácido bis-fosfonometil-aminometil fosfónico (BPMAEPA), el cual es un retardante de llama soluble en agua. Brevemente, se agregaron H_3PO_3 (19,68 g, 0,24 mol) y HCHO (7,21 g, 0,24 mol) a un matraz de 250ml con agitación magnética y calentado a reflujo. Luego se añadió pentetilenoamina (6,91 g, 0,03 mol), disuelta en 50 ml de agua desionizada a la solución anterior con agitación continua mientras se aumentaba la temperatura a 110 °C. Luego, la solución sobrenadante se hizo reaccionar durante 3,5 h. Finalmente, se eliminó el agua por evaporación rotatoria y los productos crudos se lavaron suficientemente con etanol absoluto. Luego, las impurezas que disuelven el etanol se eliminaron mediante un proceso de filtración por separación. Los productos se secaron a 40 °C en una estufa de vacío y se obtuvo un producto de color marrón rojizo. El producto se lavó con etanol absoluto 3 veces y se secó al vacío. El rendimiento de esta reacción fue del 93%. El BPMAEPA se secó en una estufa de vacío (45 °C, 0,1 MPa) durante 12 h para su uso posterior.

Por último, la tela de PET se trató con retardadores de llama a través del proceso de curado en seco. Con ese fin, se disolvió BPMAEPA de diferentes pesos en agua desionizada para preparar soluciones de 300 g/L, 400 g/L y 500 g/L, respectivamente. Se añadieron 0,01 mol de metacrilato de 3-(trimetoxisililo) propilo (KH-570) a las soluciones anteriores y se agitaron a temperatura ambiente durante 12 h seguido de la adición de persulfato de sodio al 2% en peso (sobre el peso de KH-570). Vale la pena recalcar que, éste último es un tipo de silano libre de halógenos con excelente retardo de llama y buena estabilidad térmica.

Ahora bien, la tela PET se impregnó en la solución preparada con dos baños y dos “pads” con 100 % de captación. El tejido se secó previamente a 90 °C durante 1 min y se curó a



150 °C durante 5 min. Las muestras curadas se lavaron adecuadamente con una solución de detergente al 0,5%, se enjuagaron con agua desionizada y se secaron a temperatura ambiente. Las muestras tratadas se etiquetaron como PETBPMAEPA300, PETBPMAEPA400 y PET-BPMAEPA500, respectivamente. Este proceso se evidencia de manera resumida en la figura 24.

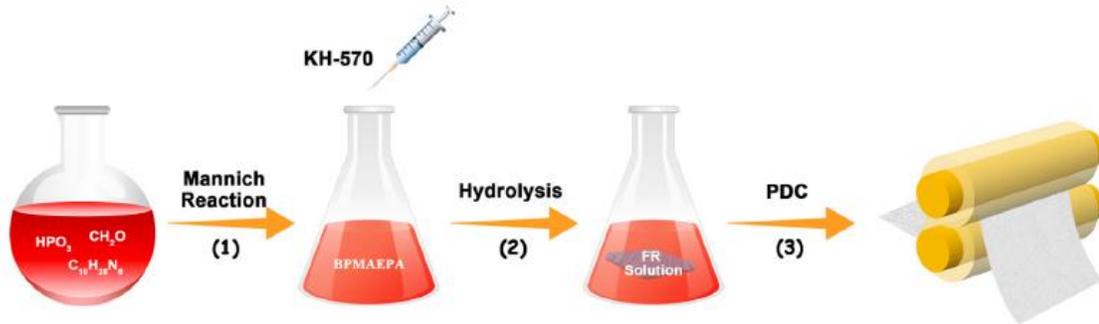


Figura 24: Ilustración esquemática de la preparación de tejido PET ignífugo

Fuente: Zhang et al. (2022)

Luego de la caracterización de los tejidos preparados anteriormente, se encontró que tras la adición de 500 g/L de BPMAEPA, se logró un alto índice limitante de oxígeno LOI y se eliminó el goteo de la masa fundida. Por otro lado, se redujo la cantidad de productos combustibles producidos durante el proceso de descomposición térmica, la longitud dañada (de más de 30 cm a 3,8 cm), la liberación de calor total (THR) y la liberación de calor promedio de PET-BPMAEPA500 (debido al mecanismo retardante de llama de doble fase de los recubrimientos). Además, el residuo carbonizado aumentó en un 78 %.

- **Tejido de PET superhidrófobo sin flúor con alto flujo de aceite para la separación de agua y aceite**

En este trabajo realizado por Huang, Huo et al. (2021) se fabricó un tejido superhidrófobo a través de un método de sol-gel de un solo recipiente utilizando ingredientes rentables y ecológicos dentro de los que se encuentran: El hexadeciltrimetoxisilano (HDTMS), que es un químico ecológico y libre de flúor, se ha aplicado ampliamente para disminuir la energía superficial; el polidimetilsiloxano terminado en hidroxilo (HTPDMS) puede reaccionar con los grupos hidroxilo (-OH) de los tejidos para formar enlaces covalentes, lo que puede mejorar la durabilidad de las superficies hidrofóbicas y el poli (metilhidrógeno) siloxano (PMHS) que se agregó a la fórmula para disminuir aún más la energía superficial.

Ahora bien, para preparar la capa superhidrofóba, se empezó disolviendo HDTMS en agua destilada con agitación constante durante 30 min. Se añadió gota a gota una solución

acuosa de amoníaco (1,0% en peso) mientras se agitaba durante 2 h. La solución compuesta de SiO₂ se preparó agregando PMHS y HTPDMS al mismo tiempo con agitación constante durante 2 h. Después, se pre-trató la tela de PET (5,0 cm × 5,0 cm) con SDBS (0,1% en peso) y DBTD para luego, ser tratada con la solución compuesta de SiO₂ preparada anteriormente. Tras un proceso de remojo, el tejido tratado se secó y curó a 130 °C durante 1 min. Este proceso se resume en la figura 25.

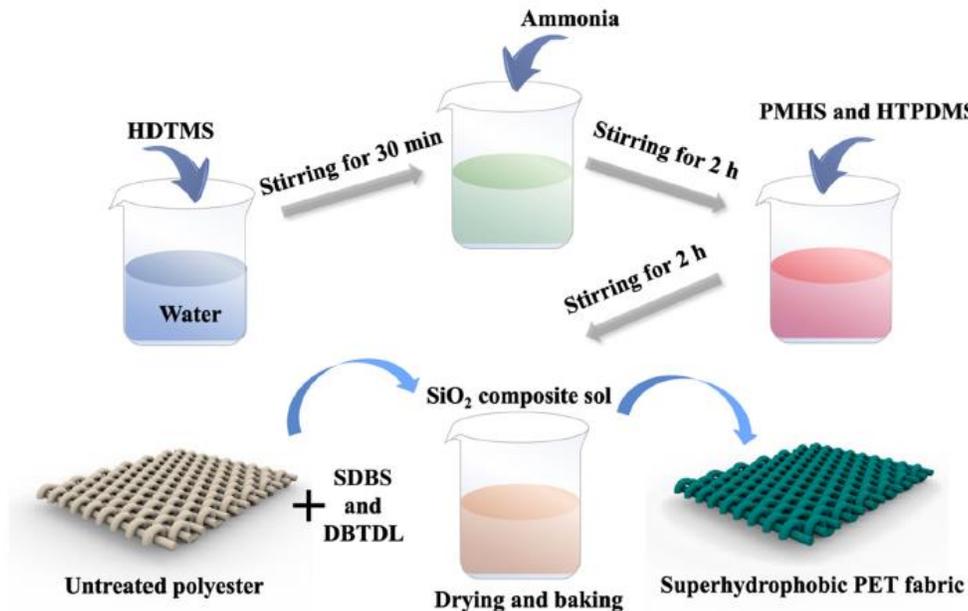


Figura 25: Proceso de preparación de sol compuesto de SiO₂ y tejido de poliéster superhidrófobo

Fuente: Huang, Huo et al. (2021)

A través de este proceso, se dotó el tejido PET de una excelente eficiencia de separación la cual alcanzó un valor de 99,8% para aceites pesados y un 98,5% para aceites livianos. Además, el tejido adquirió propiedades como hidrofobicidad, durabilidad de lavado, buena reutilización y excelentes propiedades de autolimpieza; y se descubrió que la eficiencia de separación de los aceites (tanto el pesado como el liviano) aumentó con el aumento del ángulo de contacto, lo que indica que la hidrofobicidad y la eficiencia de separación de aceite y agua tenían una correlación positiva.



4.2 Tabla de caracterización

En la tabla 8 se presentan el resumen de los principales reactivos, método utilizado, tipo de tratamiento y propiedades obtenidas de cada uno de los trabajos consultados.

Tabla 8: Tabla de caracterización

PAPERS	Principales reactivos	Método utilizado	Tipo de tratamiento	Propiedades obtenidas
1	Grafeno y Plata (nanocompuesto)	Inmersión simple	Químico	Hidrófobas y antibacterianas
2	Óxido de cobre y Turmalina	Polimerización	Químico	Antibacterianas
3	DTMS (dodeciltrimetoxisilano) y Óxido de Titanio	Recubrimiento por inmersión (dip coating)	Químico	Autorreparantes e hidrófobos
4	SCC (clorofila de cobre y sodio) y APSFA (fosfato de amonio de éster de ácido graso de sacarosa)	Inmersión simple	Químico	Ignífugas, antigoteo y de teñido

5	910-dihidro-9-oxa-10-fosfafenantreno-10-óxido (DOPO)	Tratamiento con fluidos supercríticos	Químico	Ignífugas
6	Óxido de grafeno y óxido de estaño	Método de agotamiento (exhaustion method)	Químico	Electroconductoras y de bloqueo UV
7	Óxido de Zinc y Óxido de Silicio (nanoestructuras)	Inmersión simple	Químico	Hidrófobas y de bloqueo UV
8	Óxido de Cobre (Cu ₂ O), Fosfuro de Circonio (OZrP) y Bromuro de octadecilo trifenilfosfonio (OTP) (nanoláminas)	Mezcla e hilado por fusión	Químico	Antibacterianas
9	Sulfuro de cobre (CuS) (película de nanoestructuras)	Deposición química	Químico	Accionamiento dual electrotérmico/fototérmico
10	2,2-dimetil-1,3-propanodiol-(2'-hidroxietil) fosforamidato (DPHP)	Recubrimiento por inmersión (dip coating) 2x	Químico	Ignífugas y antigoteo



11	Pirrol, Niquel	Deposición química	Químico	Conductoras
12	BPMAEPA, KH-570 (Fósforo, Niquel y Silicio)	Método pad-dry ó tratamiento por impregnación (tipo de dip-coating)	Químico	Ignífugas, antigoteo y de estabilidad térmica
13	Hexadeciltrimetoxisilano (HDTMS), polidimetilsiloxano terminado en hidroxilo (HTPDMS) y poli (metilhidrógeno) siloxano (PMHS).	Inmersión	Químico	Alto flujo (aceite)

Fuente: Elaboración propia

Dependiendo de las propiedades obtenidas, se puede determinar los usos potenciales de las fibras tratadas. Dentro de las principales propiedades obtenidas se encuentran la hidrofobicidad, ignifugidad, antigoteo, bloqueo UV y teñido; estas propiedades tienen potenciales aplicaciones en la industria de la moda y tapicería de muebles. Además de estas propiedades se obtienen también propiedades antibacterianas, y esto tiene potencialidad específicamente a las telas de protección médica.

Por otro lado, propiedades de autorreparación y electroconducción se relacionan con el desarrollo de textiles inteligentes para productos como antenas textiles o calentadores portátiles. Por último, tejidos con la capacidad de discriminar el paso de fluidos son ampliamente útiles en la purificación de aguas residuales gracias a la separación de contaminantes.

En general, el campo de aplicación de los tratamientos para fibras PET es demasiado amplio y su estudio permite solventar necesidades importantes en prácticamente todas las áreas e industrias.

Conclusiones, recomendaciones y limitaciones del estudio

5.1 Conclusiones

Este trabajo de investigación tuvo como principal objetivo explorar el uso de fibras PET en la industria textil focalizándose en la descripción y caracterización de tratamientos para mejorar sus propiedades. Esto se hizo a través de un estudio de vigilancia tecnológica que dio como resultado unas interesantes conclusiones. En ellas se reúne información sobre las técnicas, reactivos, propiedades esperadas y aplicaciones que más destacan dentro de los trabajos consultados. Se concluyó que:

- El dip-coating es el principal método utilizado en los tratamientos descritos. Esto se puede atribuir a su flexibilidad y gran variedad. Dentro de sus diferentes variaciones se encontró aplicado en los papers: inmersión simple, inmersión, deposición e impregnación.
- Las nanoestructuras en diferentes formas fueron ampliamente utilizadas en los tratamientos descritos. Esto permite concluir que no sólo es importante el tipo de reactivo utilizado, sino también la forma en que es incorporado a las fibras. Además, dado el éxito de los tratamientos, se evidencia la capacidad de las nanoestructuras para potenciar las propiedades de los textiles convencionales.
- Además de los reactivos, la forma o estructura del sustrato (PET) también se considera un factor importante en el alcance de las propiedades. Por ejemplo, se encontró que el tejido NW-PET (Non-woven PET) tuvo un comportamiento superior al tejido WK-PET (Warp knitted PET) en lo que respecta a conductividad y blindaje de interferencia electromagnética.
- La mayoría de los tratamientos descritos buscan proporcionar propiedades hidrófobas, ignífugas y antibacteriales. Sin embargo, entre ellos también destaca la búsqueda de propiedades relacionadas con el desarrollo de textiles inteligentes como lo son la autorreparación y electroconductividad; además de la búsqueda de propiedades con fines ambientales como el alto flujo para separación de fluidos contaminantes. Estos dos últimos enfoques representan una oportunidad importante para la industria futura.
- Se evidencia que todos los tratamientos descritos son de tipo químico. A pesar de que algunos de ellos como la inmersión simple se consideran sencillos y aplicables a industria manufacturera, aún existe el reto de simplificar estos procesos mediante la reducción de pasos y reactivos.



- Aparte del reciclaje, la utilización de reactivos no contaminantes también se considera un factor crucial en la búsqueda por reducir el impacto ambiental de cualquier proceso. En este caso, de poco sirve la utilización de fibras recicladas si los tratamientos aplicados para la mejora de sus propiedades incluyen reactivos contaminantes. Dentro de los trabajos consultados se encontró el uso de reactivos naturales basados en la clorofila de cobre y sodio y compuestos libres de halógenos como fósforo, nitrógeno y silicio.

5.2 Limitaciones y recomendaciones

Los trabajos de investigación descritos en este documento ratifican la eficacia de los diferentes tratamientos en la mejora de las propiedades de las fibras PET. Sin embargo, en estos trabajos no se especifica el uso de fibras PET recicladas. Por tanto, se recomienda que en futuras investigaciones se realice un comparativo entre los resultados de tratamientos realizados a ambas fibras PET vírgenes y recicladas y de esta forma determinar si existe una diferencia significativa entre ambos.

Además, se recomienda para futuras investigaciones tener en cuenta factor costo e impacto ambiental con el objetivo de determinar la viabilidad de los diferentes métodos de reciclaje y tratamientos aplicados a la fibra PET.

Por otro lado, se identifica como oportunidad de investigación el estudio de la relación entre la estructura del sustrato (PET) y el alcance de diferentes propiedades. Además de la búsqueda de reactivos naturales y no halógenos para ejercer cada vez un menor impacto ambiental en procesos textiles.



Referencias bibliográficas

- Residuos Profesional. (2021). El impacto del sector textil y sus residuos en el medio ambiente. <https://www.residuosprofesional.com/impacto-sector-textil-sus-residuos/>
- Unión Sindical Obrera. (2020). El “Green Deal” o Pacto Verde Europeo: qué es y cuáles son sus objetivos. <https://www.uso.es/green-deal-o-pacto-verde-europeo-que-es-y-objetivos/>
- EcoNoticias. (2018). Así dañan el medio ambiente las botellas de plástico. <https://gestoresderesiduos.org/noticias/asi-danan-el-medio-ambiente-las-botellas-de-plastico>
- Avatar Energía. (s.f.). Fabricar telas a partir de botellas de PET para prendas de vestir y más. <https://avatarenergia.com/telas-a-partir-de-botellas-de-pet/>
- Quintero, L.A. (2016). Diseño de una planta de reciclado de Tereftalato de polietileno (PET). [Tesis de pre-grado]. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. <https://riunet.upv.es/handle/10251/59710>
- EValue. (s.f.). Cómo realizar vigilancia tecnológica y prospectiva de la I+D+I. <https://www.evalueconsultores.com/como-realizar-vigilancia-tecnologica-y-prospectiva-de-la-idi/>
- Moda Es. (2018). La industria de la moda emplea 300 millones de trabajadores en el mundo. Moda Es Latinoamérica. <https://www.modaes.com/entorno/la-industria-de-la-moda-emplea-300-millones-de-trabajadores-en-el-mundo-es.html>
- Mohorte. (2020). Los países que más ropa exportan al resto del planeta, ilustrados en un mapa. Magnet. <https://magnet.xataka.com/preguntas-no-tan-frecuentes/paises-que-ropa-exportan-al-resto-planeta-ilustrados-mapa>
- Promperú. (2018). Panorama mundial del mercado: Textiles y prendas de vestir. Departamento de inteligencia de mercados. <https://www.siicex.gob.pe/siicex/resources/estudio/609578798rad19876.pdf>
- Procolombia. (s.f.). Datos de industria. <https://procolombia.co/swim-shown/datos-de-industria>
- El Nuevo Siglo. (2019). El sector textil ha perdido 600 mil empleos. <https://www.elnuevosiglo.com.co/articulos/03-2019-el-sector-textil-ha-perdido-600-mil-empleos-en-12-anos>
- Sierra, I. (2020). Tiramos a la basura un 811% más de ropa que en 1960. Y eso también se está cargando el planeta. Magnet. <https://magnet.xataka.com/en-diez-minutos/tiramos-811-ropa-que-1960-cargando-planeta>
- Generación Vitnik. (2018). La industria textil y la problemática ambiental. <http://www.generacionvitnik.com/2018/08/06/la-industria-textil-y-la-problematica-ambiental/>
- Montero, M.A. (2021). Huella Ecológica del sector Textil-Confección en Colombia para el año 2018. [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana de Colombia].



- Repositorio institucional de la Universidad Pontificia Javeriana de Colombia. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/52684/SENTENAM-TEISIS.pdf?sequence=2&isAllowed=y#:~:text=En%20cuanto%20a%20los%20ambientales,%2DJaime%20I%2C%202016>
- Linde, P. (2014). Mucho empleo, enorme precariedad. El País. https://elpais.com/elpais/2014/04/15/planeta_futuro/1397577261_900969.html
 - Salinas, M.P. (2021). Fashion Pact. ¿Qué es? Sus 3 claves. EOB. <https://enriqueortegaburgos.com/fashion-pact-que-es-sus-3-claves/>
 - Salinas, M.P. (2019). Reciclaje textil “Rehubs”. EOB. <https://enriqueortegaburgos.com/reciclaje-textil-rehubs/>
 - Parlamento Europeo. (2020). El impacto de la producción textil y de los residuos en el medio ambiente. <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20201208STO93327/el-impacto-de-la-produccion-textil-y-de-los-residuos-en-el-medio-ambiente>
 - Ramírez, M. (2018). El reto de la moda responsable. El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/industria-textil-le-apunta-al-cuidado-del-medioambiente-259024>
 - Eschberger, T. (2019). Soluciones sostenibles en la industria textil. Blog de LEAD Innovation. <https://www.lead-innovation.com/es/blog/soluciones-sostenibles-en-la-industria-textil>
 - Sandin, G., & Peters, G. M. (2018). Environmental impact of textile reuse and recycling e A review. Journal of Cleaner Production, 184, 353–365. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.266>
 - LISA Institute. (2020). ¿Qué es la Vigilancia Tecnológica? Tipos y ejemplos. <https://www.lisainstitute.com/blogs/blog/que-es-la-vigilancia-tecnologica-tipos-ejemplos>
 - Observatorio Tecnológico Universidad de Alicante. (s.f.). Guía de Vigilancia e Inteligencia Tecnológica. <https://www.ovtt.org/guias/guia-de-inteligencia-tecnologica/>
 - Curso de fundamentos de ciencia de materiales. (s.f). Universidad Politécnica de Valencia. https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_3.html
 - Textos científicos. (2005a). Uso del PET en envases alimentarios. <https://www.textoscientificos.com/polimeros/pet/envases>
 - Beltran, M. (2012). Tecnología de los polímeros. Alicante: Publicaciones de la Universidad de Alicante. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16883/1/Tema_1_Estructura_y_propiedades_de_los_polimeros.pdf
 - Elías, X., & Jurado, L. (2012). Reciclaje de residuos industriales. Madrid: Díaz de Santos S.A. <https://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788479788353.pdf>
 - Ojeda, M. (2011a). Materiales plásticos, características, usos, fabricación, procesos de transformación y reciclado: Tecnología de los plásticos. Obtenido de sitio web



de Tecnología de los plásticos:
<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/poliestireno.html>

- Martínez, M. (23 de febrero de 2013). Polyester: Todo polyester. Obtenido de sitio web de Todo polyester: http://todopolyester.blogspot.com/2013_02_01_archive.html
- Muñoz, L. (2012). Estudio del uso del polietileno tereftalato como material de restitución en suelos de baja capacidad de carga. México: Universidad Nacional Autónoma de México. https://repositorio.unam.mx/contenidos/estudio-del-uso-del-polietileno-tereftalato-pet-como-material-de-restitucion-en-suelos-de-baja-capacidad-de-carga-221076?c=LDB8nZ&d=false&q=*&i=10&v=1&t=search_0&as=0
- Sánchez, M., & Paredes, P. (2014). Estudio de la viabilidad técnica de la implementación del tereftalato de polietileno como material para la estabilización de taludes. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1703/3/ARTICULO%20VIABILIDAD%20TECNICA%20PET.pdf>
- Servei Estació. (s.f.). ¿QUÉ ES EL PET? CARACTERÍSTICAS, USOS Y APLICACIONES. <https://serveiestacio.com/blog/que-es-el-pet/#>
- Flores Torres, D. I. (2011). Elaboración de una guía didáctica virtual para los procesos de hilatura de fibras largas [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/730>
- Instituto Textil Nacional. (2019). El Hilo. <https://www.institutotextilnacional.com/2019/09/19/el-hilo/>
- Recytrans. (2016). ¿Qué es el reciclaje? <https://www.recytrans.com/blog/que-es-el-reciclaje/>
- Gabriel Bolívar. (2018). Monómeros: características, tipos y ejemplos. Lifeder. <https://www.lifeder.com/monomeros/>
- Strehon Says (s.f.). Diferencia entre oligómero y polímero. <https://es.strehonsays.com/oligomer-and-polymer-4509>
- Keßler, L., Matlin, S. A., & Kümmerer, K. (2021). ScienceDirect The contribution of material circularity to sustainability — Recycling and reuse of textiles. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 32, 100535. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100535>
- Choudhury, A. K. R. (s.f.). Environmental Impacts of the Textile Industry and Its Assessment Through Life Cycle Assessment. <https://doi.org/10.1007/978-981-287-110-110->
- Burgos, E. (2021). El alquiler de ropa. El modelo de “Rent The Runway”. EOB. <https://enriqueortegaburgos.com/el-alquiler-de-ropa-fashion-rental-el-modelo-de-rent-the-runaway/>



- González, I.O. (2021). Comparación de los modelos: Fast Fashion vs Slow Fashion. EOB. <https://enriqueortegaburgos.com/comparacion-de-modelos-fast-fashion-vs-slow-fashion/>
- Máster logística. (2012). Todo sobre las propiedades el algodón. <https://www.masterlogistica.es/todo-sobre-las-propiedades-del-algodon/>
- FAO. Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura. (2021). Fibras del Futuro. <https://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/jute/es/>
- Coats. (2021). Todo sobre las fibras textiles. <https://coats.com/es/information-hub/Know-About-Textile-Fibres>
- Portillo, S. (2020a). ¿Cuánto tarda en degradarse el algodón? Ecología Verde. <https://www.ecologiaverde.com/cuanto-tarda-en-degradarse-el-algodon-3171.html#:~:text=Cu%C3%A1nto%20tiempo%20tarda%20en%20degradarse%20el%20algod%C3%B3n,La%20descomposici%C3%B3n%20del&text=Ya%20sea%20una%20camiseta%20o,de%20la%20tela%20de%20algod%C3%B3n>
- Portal vida sana. (2021). ¿Cuánto tarda la ropa en degradarse?. <https://www.portalvidasana.com/cuanto-tarda-la-ropa-en-degradarse.html>
- WearItSlow. (2018). ¿Cuánto tardan las prendas en descomponerse?. <https://www.wearitslow.com/2018/07/12/cuanto-tardan-las-prendas-descomponerse/>
- Portillo, S. (2020b). ¿Cuánto tarda en degradarse el plástico?. <https://www.ecologiaverde.com/cuanto-tarda-en-degradarse-el-plastico-2693.html>
- Méndez, A. (2016). Detrás de la producción del PET. Plastics Technology Mexico. <https://www.pt-mexico.com/articulos/detras-de-la-produccion-del-pet>
- Textos científicos. (2005b). Producción de PET. <https://www.textoscientificos.com/polimeros/pet/produccion-pet>
- Ribul, M., Lanot, A., Tommencioni, C., Purnell, P., Mcqueen-mason, S. J., & Baurley, S. (2021). Mechanical , chemical , biological : Moving towards closed-loop bio-based recycling in a circular economy of sustainable textiles. *Journal of Cleaner Production*, 326(October), 129325. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129325>
- Lopez, C. (2016). Reciclado del plástico PET para la obtención de fibra textil. [Tesis de pre-grado]. Universidad Tecnológica Nacional. http://www.edutecne.utn.edu.ar/indices/trabajo_final_de_carrera.html
- Ruiz Ruiz, Marcos, & Mansilla Pérez, Laura (2009). Reciclaje de botellas de PET para obtener fibra de poliéster. *Ingeniería Industrial*, (27),123-137. [fecha de Consulta 2 de septiembre de 2022]. ISSN: 1025-9929. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=337428493008>
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Ministerio de Fomento. (2013). Residuos plásticos: Reciclaje químico. <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/37/residuos-plasticos/gestion-del-residuo/valorizacion-material/250/reciclaje-quimico.html>



- Ojeda, M. (2011b). Tecnología de los plásticos: Proceso de reciclaje del PET. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/proceso-de-reciclaje-del-pet.html>
- Ojeda, M. (2011c). Tecnología de los plásticos: Reciclado químico del PET. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/reciclado-quimico-de-pet.html>
- Mendez, A. (2021). Reciclado químico: una reflexión técnica sobre la despolimerización del PET. <https://www.pt-mexico.com/articulos/reciclado-quimico-una-reflexion-tecnica-sobre-la-depolimerizacion-del-pet->
- Bardales-Cáceres, E.R., & Seclen-Reyna, M.V. (2021). Instalación de una planta de producción de Bis Hidroxi Etilen Tereftalato por glicolisis de PET reciclado. [Tesis de pre-grado]. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/9702>
- Martínez, U. (s.f.). Evaluación de Acetato de Plomo como Catalizador para reciclaje químico de Materiales plásticos desechables. [Tesis de pre-grado]. Universidad Autónoma Metropolitana. <https://energia.azc.uam.mx/index.php/en/pi1/proyectos-de-investigacion#procesos-de-la-industria-quimica>
- Elgegren, Mariela, Tiravanti, Giulliana J., Ortiz, Bruno A., Otero, Manuel E., Wagner, Florian, Cerrón, Daniel A., & Nakamatsu, Javier. (2012). Reciclaje químico de desechos plásticos. Revista de la Sociedad Química del Perú, 78(2), 105-119. Recuperado en 01 de septiembre de 2022, de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2012000200005&lng=es&tlng=es
- Suasnavas, D.F. (2017). Degradación de materiales plásticos “PET” (polyethylene terephthalate), como alternativa para su gestión. [Tesis de pre-grado]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/13224>
- Carcaño, Josué Ricardo. (2009). Estudio de factibilidad para la instalación de una planta recicladora de envases de PET. Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas. <https://tesis.ipn.mx/jspui/handle/123456789/4504>
- Oquadil, B., Amadine, O., Essamlali, Y., Cherkaoui, O., & Zahouily, M. (2019). A new route for the preparation of hydrophobic and antibacterial textiles fabrics using Ag-loaded graphene nanocomposite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 579, 123713. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123713>
- Zhou, J., Zhai, M., Wang, R., Wang, Y., Wang, Q., Hu, Z., ... & Zhu, M. (2022). High metal-loaded Cu₂O@ TM hybrids for melt-spun antibacterial fibers engineered towards medical protective fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 161, 107080. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107080>
- Zhou, F., Zhang, Y., Zhang, D., Zhang, Z., Fu, F., Zhang, X., ... & Chen, Y. (2021). Fabrication of robust and self-healing superhydrophobic PET fabrics based on



- profiled fiber structure. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 609, 125686. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125686>
- Liu, Y., Zhao, W., Yu, X., Zhang, J., Ren, Y., Liu, X., ... & Wang, J. (2022). Preparation of dyeing, flame retardant and anti-dripping polyethylene terephthalate fibers based on natural sodium copper chlorophyll dyeing and intercalation of phosphorylated sucrose fatty acid ester. *Composites Part B: Engineering*, 245, 110194. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110194>
 - Oh, J., Kim, S. S., Lee, J., & Kang, C. (2021). Supercritical fluid flame-retardant processing of polyethylene terephthalate (PET) fiber treated with 9, 10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide (DOPO): Changes in physical properties and flame-retardant performance. *Journal of CO2 Utilization*, 54, 101761. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101761>
 - Babaahmadi, V., & Montazer, M. (2016). Reduced graphene oxide/SnO2 nanocomposite on PET surface: Synthesis, characterization and application as an electro-conductive and ultraviolet blocking textile. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 506, 507-513. <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.07.025>
 - Xue, C. H., Yin, W., Zhang, P., Zhang, J., Ji, P. T., & Jia, S. T. (2013). UV-durable superhydrophobic textiles with UV-shielding properties by introduction of ZnO/SiO2 core/shell nanorods on PET fibers and hydrophobization. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 427, 7-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.03.021>
 - Zhou, J., Wang, Y., Pan, W., Xiang, H., Li, P., Zhou, Z., & Zhu, M. (2021). High thermal stability Cu2O@ OZrP micro-nano hybrids for melt-spun excellent antibacterial activity polyester fibers. *Journal of Materials Science & Technology*, 81, 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.01.013>
 - Zhang, Q., Liu, D., Pan, W., Pei, H., Wang, K., Xu, S., ... & Cao, S. (2022). Flexible Stretchable Electrothermally/Photothermally Dual-Driven Heaters from Nano-Embedded Hierarchical CuxS-Coated PET Fabrics for All-Weather Wearable Thermal Management. *Journal of Colloid and Interface Science*. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.05.159>
 - Zhang, C., Zhang, C., Hu, J., Jiang, Z., & Zhu, P. (2021). Flame-retardant and anti-dripping coating for PET fabric with hydroxyl-containing cyclic phosphoramidate. *Polymer Degradation and Stability*, 192, 109699. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109699>
 - Liu, Q., Yi, C., Chen, J., Xia, M., Lu, Y., Wang, Y., ... & Wang, D. (2021). Flexible, breathable, and highly environmental-stable Ni/PPy/PET conductive fabrics for efficient electromagnetic interference shielding and wearable textile antennas. *Composites Part B: Engineering*, 215, 108752. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108752>



- Ding, F., Zhang, S., Chen, X., Li, R., & Ren, X. (2022). PET fabric treated with environmental-friendly phosphorus-based compounds for enhanced flame retardancy, thermal stability and anti-dripping performance. *Composites Part B: Engineering*, 235, 109791. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109791>
- Huang, G., Huo, L., Jin, Y., Yuan, S., Zhao, R., Zhao, J., ... & Li, Y. (2022). Fluorine-free superhydrophobic PET fabric with high oil flux for oil–water separation. *Progress in Organic Coatings*, 163, 106671. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106671>