



aitex[®]
textile research institute

CHEMUP III

**RECICLADO
QUÍMICO DE
RESIDUOS TEXTILES
POST-CONSUMO**





Contenido

1. Ficha técnica del proyecto	3
2. Antecedentes y motivaciones	4
3. Objetivos del proyecto	7
4. Plan de trabajo.....	8
5. Resultados obtenidos	9
6. Impacto empresarial	14



1. Ficha técnica del proyecto

Nº EXPEDIENTE	IMAMCA/2023/6
TÍTULO COMPLETO	RECICLADO QUÍMICO DE RESIDUOS TEXTILES POST-CONSUMO
PROGRAMA	Plan de Actividades de Carácter no Económico 2023
ANUALIDAD	2023
ENTIDADES FINANCIADORAS	IVACE – INSTITUT VALENCIÀ DE COMPETITIVITAT EMPRESARIAL www.ivace.es
ENTIDAD SOLICITANTE	AITEX
C.I.F.	G03182870



GENERALITAT
VALENCIANA



Este proyecto cuenta con el apoyo de la Conselleria d'Economia Sostenible, Sectors Productius i Treball, a través de IVACE (Institut Valencià de Competitivitat Empresarial)



2. Antecedentes y motivaciones

Diferentes sectores industriales, tales como el sector textil, embalaje, automoción, construcción u otros, han consumido importantes cantidades de polímeros sintéticos a lo largo de las últimas décadas, donde su sistema de producción, distribución y uso opera de forma casi lineal, siendo un modelo insostenible debido a la generación y acumulación de residuos. Además, la gran mayoría de los polímeros sintéticos están diseñados para brindar rendimiento y durabilidad, no degradabilidad y reciclabilidad, lo que ha provocado un enorme problema de acumulación de residuos en las últimas décadas. Como consecuencia, a finales de 2020, de las 55 millones de toneladas producidas en Europa, únicamente se recuperaron el 53% de los residuos plásticos post-consumo, donde el 42% fueron incinerados, el 35% reciclados y el 24% depositados en vertederos o en el medio natural.¹

Por su parte, en el sector textil, de las 116 millones de toneladas de fibras producidas a nivel mundial en 2022, aproximadamente el 65% fueron fibras sintéticas, el 27% fibras naturales y el 6% fibras artificiales. Entre las fibras sintéticas, destaca el poliéster, con una cuota de mercado de aproximadamente el 90% del total de las fibras sintéticas, lo que representa una producción de 63 millones de toneladas anuales y una participación global del 54% (Figura 1).²

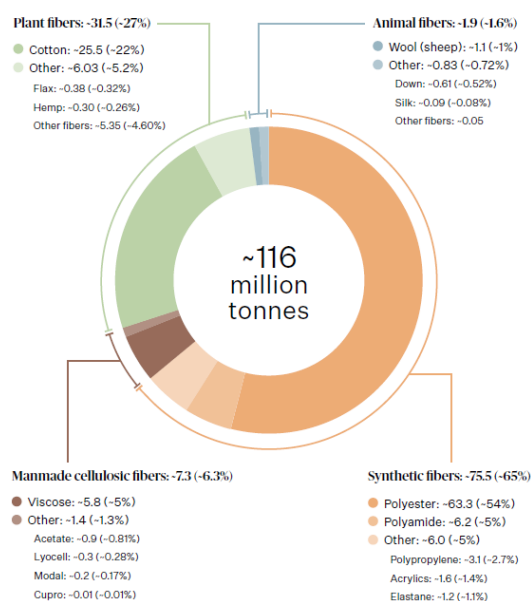


Figura 1. Producción mundial de fibras en 2022.

Como resultado, la industria mundial de textiles consumió aproximadamente 93 mil millones de m³ de agua, lo que representa más del 20% de la contaminación global de agua. Además, fue responsable de la generación de 92 millones de toneladas de residuos, lo que supone entre el 3 y el 10% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero.³

Como consecuencia, el impacto ambiental asociado al sector textil se ha convertido en uno de los temas más preocupantes de la actualidad. El creciente consumo de bienes textiles por parte de la población, unido al modelo de consumo actual, conlleva la generación de grandes cantidades de residuos, donde solo en España

¹ Plastics Europe. Plastics - the Facts 2021. An analysis of European plastics production, demand, and waste data.

² <https://textileexchange.org/app/uploads/2023/11/Materials-Market-Report-2023.pdf>

³ Mc Kinsey &Company. 2022. Scaling textile recycling in Europe—turning waste into value.

se estima que el residuo anual de ropa asciende a 1.100.000 toneladas.⁴ Por ello, si no se aplican cambios en el modelo industrial actual, las estimaciones indican que estas cifras aumentarán al menos en un 50% para 2030.

Actualmente, **con las tecnologías disponibles** en Europa, menos de la mitad de la ropa usada se recolecta para su reutilización o reciclaje cuando ya no se necesita, y **solo el 1% se recicla en ropa nueva**. En los últimos años, con el objetivo de dar respuesta al problema de la mala reciclabilidad de los polímeros de origen fósil, están emergiendo diferentes **tecnologías basadas en el reciclaje químico**, ya que los métodos tradicionales, como el primario (reuso-reutilización), el secundario (mecánico/termo-mecánico) y el cuaternario (recuperación de energía) no han proporcionado resultados satisfactorios.

A) Reciclado químico de residuos textiles de poliéster:

La fibra que lidera el mercado del textil es el tereftalato de polietileno (PET), alcanzando un 54% de la producción global. En las últimas décadas, el poliéster se ha convertido en la fibra más empleada gracias a su ligereza, bajo coste y altas prestaciones mecánicas. En la actualidad, la tecnología de reciclado de poliéster más extendida es el reciclaje termo-mecánico, dada su sencillez y bajo coste. El reciclado termo-mecánico consiste en un proceso físico en que los residuos textiles se clasifican, se lavan y se reprocesan mediante un proceso de extrusión (fusión). Las desventajas de este método residen, principalmente, en la heterogeneidad de los residuos sólidos y el deterioro de las propiedades del producto en cada ciclo de extrusión. Es por ello que, la mayoría de las prendas que se reciclan mecánicamente pierden el 75% de su valor, por lo que no suelen emplearse para fabricar nuevos productos textiles, sino que se transforman en materiales con menores requisitos técnicos, tales como piezas de inyección o materiales de relleno.⁵ De hecho, la producción de fibra reciclada de poliéster, procedente principalmente de residuos de botella, se sitúa actualmente en los 8.4 millones de toneladas, lo que supone una cuota de mercado del 13.6% respecto a la producción global.² Por lo que, dadas las limitaciones que presentan las tecnologías convencionales de reciclado de poliéster, el reciclado químico se presenta como tecnología emergente y competitiva (Figura 2a).

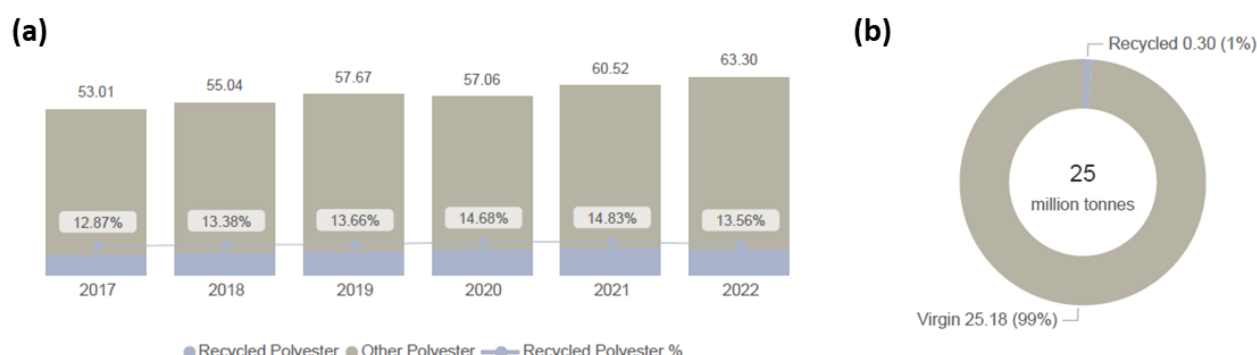


Figura 2. Producción (Mt) y cuota (%) de fibra reciclada frente a la producción global: (a) poliéster y (b) algodón.

B) Reciclado químico de residuos textiles de algodón:

Tal como se ha comentado en la sección anterior, las fibras de poliéster representan el mayor volumen de producción de la industria textil. Por su parte, el algodón, una fibra celulósica natural, le sigue con 25 millones de toneladas producidas por año, lo que supone una cuota de mercado del 22% y un uso del 2.4% de la tierra cultivable del mundo. El impacto ambiental asociado a la producción de algodón está relacionado con el uso generalizado de agroquímicos. Los fertilizantes, insecticidas, herbicidas, reguladores del crecimiento y defoliantes se han convertido en una parte integral de las prácticas de producción de algodón, consumiendo el 11% de los agroquímicos del mundo. Además, la producción de algodón supone aproximadamente el 24% del consumo mundial de plaguicidas, lo cual lleva asociado un importante impacto medioambiental. Por otra parte, el consumo de agua es otro tema de gran preocupación. En términos generales, para el cultivo y

⁴ Cáritas-ModaRe. 2019. Análisis de recogida de la ropa usada en España.

⁵ S. Park, et al., Poly (Ethylene Terephthalate) Recycling for High Value Added Textiles. Fash. Text., 2014, 1.



procesamiento de un kilo de algodón, se requieren casi 10,000 litros de agua, además de ciertas cantidades adicionales para el proceso de tintura, las cuales varían entre 30 y 200 litros de agua por kilogramo de algodón.⁶

Por su parte, el reciclado mecánico de algodón se trata de la tecnología más empleada para las fibras naturales. Este proceso comienza con el lavado, trinchado y cardado de los residuos textiles. Como resultado, la longitud de las fibras se ve reducida, lo que disminuye su calidad debido a una reducción en su resistencia y suavidad. Por este motivo, únicamente se reciclan residuos pre-consumo, ya que en los residuos post-consumo, las fibras se encuentran muy deterioradas, lo que impide obtener nuevas fibras de alta calidad. Por tanto, para mantener cierta resistencia a la tracción del hilo, es necesario mezclar las fibras recicladas con fibras sintéticas o algodón virgen. De hecho, si se quiere mantener la calidad final de los tejidos, el proceso solo permite incluir, como máximo, un 20-30% de fibras recicladas. Como resultado, la cuota de algodón reciclado es del 0.3% respecto a la producción global (Figura 2b).

Como alternativa a las fibras de algodón, existen fibras sintéticas de origen natural (MMCF, Man-Made Cellulosic Fibres) obtenidas a partir de la celulosa de la pulpa de papel, como son la viscosa y el lyocell, quienes ocupan una cuota de mercado de aproximadamente el 6%. Los procesos de obtención de la viscosa y el lyocell son las dos únicas tecnologías que han sido industrialmente desarrolladas para la producción de MMCF, pero sus procesos presentan importantes inconvenientes medioambientales que han limitado su crecimiento dentro del sector en la última década. Por tanto, existe la necesidad de crear nuevas tecnologías sostenibles y respetuosas con el medioambiente que permitan la obtención y reciclado de fibras de origen natural.

⁶ Stockholm Environment Institute report. Ecological Footprint and Water Analysis of Cotton, Hemp, and Polyester. Stockholm, Sweden, 2005.



3. Objetivos del proyecto

El objetivo general del proyecto CHEMUP III es la validación e implementación del reciclado químico de residuos textiles a escala piloto. Más concretamente, el proyecto CHEMUP III se centra en los siguientes objetivos específicos técnicos:

- Estudio y optimización del reciclado químico de residuos textiles de poliéster.
- Estudio y optimización del reciclado químico de residuos textiles de algodón.
- Obtención de fibras a partir de poliéster reciclado químicamente.
- Obtención de fibras a partir de algodón reciclado químicamente.
- Obtención de productos textiles de uso cotidiano a partir de fibras recicladas químicamente.

Además, presenta los siguientes objetivos de transferencia de conocimiento:

- Identificación del mercado a nivel mundial, europeo, nacional y regional.
- Identificación de las empresas involucradas en la cadena de valor.
- Elaboración de propuestas europeas y nacionales relacionadas con esta línea estratégica



4. Plan de trabajo

El plan de trabajo seguido durante el Proyecto queda recogido en el siguiente cronograma, en el que aparecen tanto los paquetes de trabajo como las distintas fases que los componen:

CHEMUP III	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
PT-0: GESTIÓN Y SEGUIMIENTO												
PT-1: PLANTEAMIENTO Y PLANIFICACIÓN												
A-1.1 Preparación de la propuesta técnico-económica												
A-1.2 Definición de los recursos necesarios												
A-1.3 Definición del plan de comunicación												
A-1.4 Definición de los prototipos a realizar												
A-1.5 Definición de los niveles de partida y objetivos												
PT-2: EJECUCIÓN TÉCNICA												
A-2.1 Estado del arte												
A-2.2 Experimental												
T-2.1.1 Triturado												
T-2.1.2 Compounding												
T-2.1.3 Depolimerización												
T-2.1.4 Polimerización												
T-2.1.5 Hilatura												
T-2.1.6 Texturizado												
T-2.1.7 Tejeduría												
A-2.3 Caracterización												
A-2.4 Análisis y reingeniería												
A-2.5 Coordinación técnica y validación												
PT-3: VIABILIDAD INDUSTRIAL Y ECONÓMICA, TRANSFERENCIA E IMPACTO (VIETI)												
A-3.1 Mercado (empresas)												
A-3.2 VIETI												
PT-4: COMUNICACIÓN Y DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS												
A-4.1 Implementación del plan de comunicación												
A-4.2 Informe ejecutivo												
PT-5: SUPERVISIÓN Y SEGUIMIENTO												

5.Resultados obtenidos

La ejecución del Proyecto ha conducido a significativos avances técnicos en las áreas de investigación propuestas, siendo éstas el reciclado químico de diferentes tipos de residuos textiles post-consumo, propiciando de manera progresiva la transición hacia una economía circular. Asimismo, se han logrado desarrollar soluciones tecnológicas que contribuyen a mitigar los problemas medioambientales asociados a la generación y acumulación de residuos textiles. Estas soluciones están diseñadas específicamente para abordar las particularidades de cada fibra, pues las necesidades de cada residuo durante el proceso de reciclado dependen de su naturaleza físico-química.

El objetivo general del proyecto CHEMUP III es la validación e implementación del reciclado químico de residuos textiles post-consumo a escala piloto. Gracias a la ejecución del Proyecto, se ha ampliado y profundizado el conocimiento generado en los proyectos CHEMUP y CHEMUP II. Los resultados se exponen en función de la composición del residuo textil, ya que la tecnología estudiada para cada uno de ellos se encuentra en diferente estado de madurez (TRL). Así, los resultados obtenidos en cada una de las líneas de investigación se describen a continuación:

1. **Reciclado químico de residuos textiles de poliéster:** para resolver el problema de acumulación y eliminación de residuos textiles, se ha estudiado el reciclado químico de residuos textiles post-consumo procedentes de la recogida selectiva mediante contenedores localizados en la vía pública. Tras una separación y clasificación selectiva en origen por el gestor autorizado mediante tecnología Fibersort (espectroscopía NIR), estos residuos han sido reciclados a través del proceso de glicólisis del poliéster. Además, se han realizado una serie de trabajos de optimización del proceso de depolimerización catalítica de residuos textiles a escala piloto (20 L), incluyendo el estudio y validación de catalizadores más eficientes, así como mejoras en la etapa de purificación del BHET obtenido tras la glicólisis.

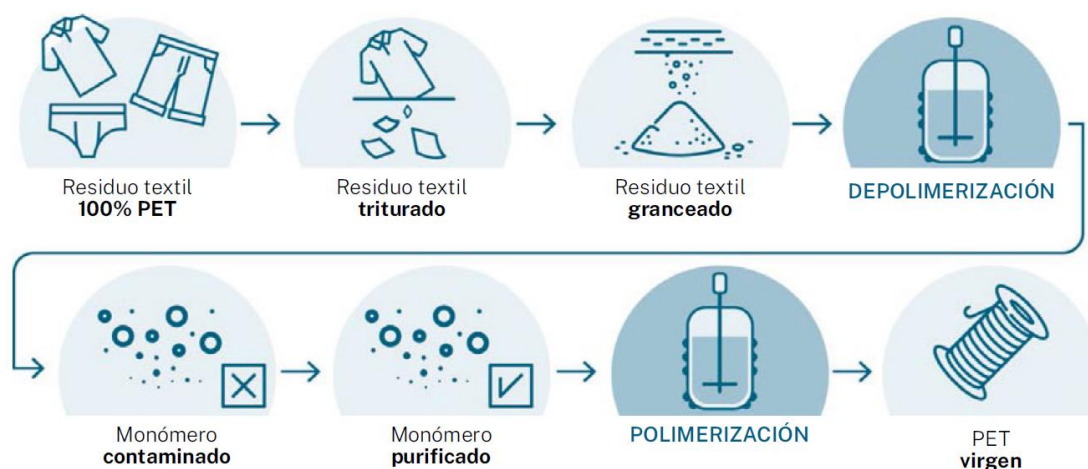


Figura 3. Diagrama del proceso de depolimerización catalítica.

Adicionalmente, se ha estudiado la reproducibilidad del proceso según el catalizador empleado, así como la influencia de la presencia de otras fibras en el rendimiento de la reacción y en la pureza del BHET obtenido. De esta forma, se confirma que un aumento en la presencia de impurezas (presencia de otras fibras y otros contaminantes) tiene un efecto negativo en el rendimiento de la reacción.

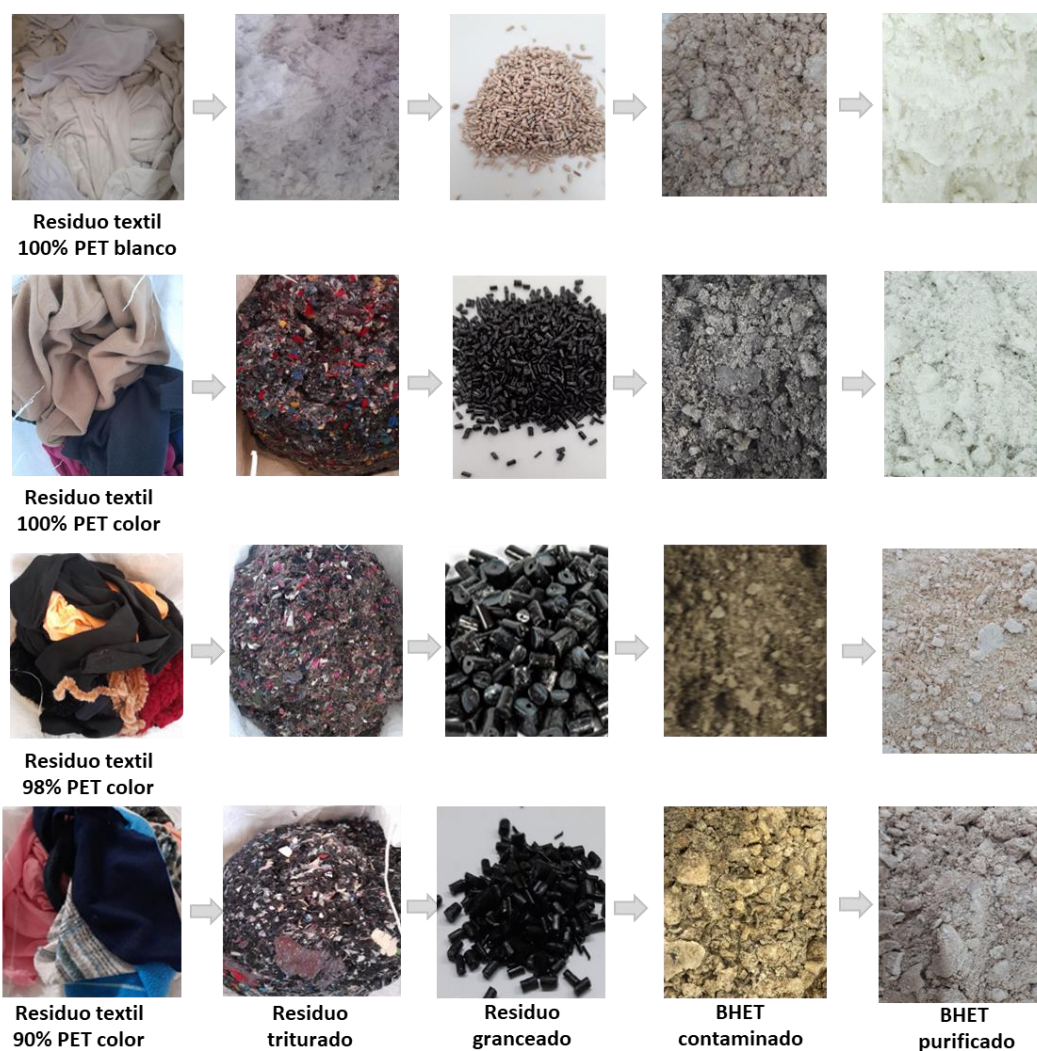


Figura 4. Procesado del residuo textil hasta la obtención de BHET purificado.

Finalmente, en la etapa de glicólisis, se ha encontrado un catalizador que ha permitido **reducir un 33% el tiempo de reacción**, lo que supone un ahorro sustancial en el consumo de energía de dicha etapa del proceso. Respecto al proceso de purificación, se ha validado un pretratamiento mecánico de carbón activo que mejora notablemente el grado de blanco del BHET obtenido, así como la eliminación de contaminantes de origen inorgánico. Además, se ha llevado a cabo de forma satisfactoria la polimerización de poliéster a partir de BHET, obteniendo un poliéster reciclado químicamente con unas propiedades reológicas adecuadas para la obtención de nuevas fibras recicladas.

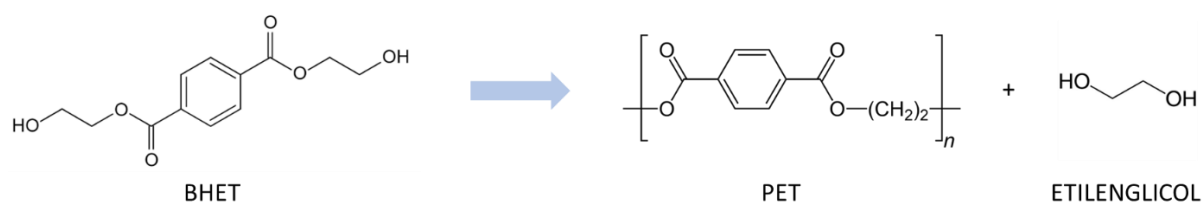


Figura 5. Esquema de la reacción de polimerización de BHET.



Figura 6. BHET (izquierda) y PET obtenido tras la polimerización (derecha).

2. **Reciclado químico de residuos textiles de algodón:** el reciclaje químico del algodón es una tecnología que necesita más I+D para poder ser implementada a escala comercial. Este proceso puede considerarse como un proceso de disolución de las fibras y posterior regeneración. En esta línea, los líquidos iónicos (IL) han demostrado ser disolventes eficientes para los materiales de base celulósica, pudiéndose utilizar para el reprocesamiento químico de algodón. Esta estrategia ha permitido el reciclado de fibras de algodón empleando un proceso de hilatura en húmedo (dry jet wet spinning) y un baño de coagulación de agua fría. Los resultados del Proyecto anterior (CHEMUP II) confirmaron la obtención de fibras naturales recicladas químicamente a escala laboratorio. Así, durante la ejecución del CHEMUP III, se ha seguido mejorando el montaje de laboratorio y optimizándolo para obtener resultados más reproducibles. Se presenta a continuación una fotografía del nuevo montaje:



Figura 7. Mejoras en el montaje a escala laboratorio del proceso de reciclado químico de algodón.

Gracias a la ejecución del Proyecto, se ha logrado optimizar el proceso de preparación del *dope*, formado por la disolución de algodón en el líquido iónico, a escala piloto mediante el uso de un amasador vertical empleado para mezclas de alta viscosidad. Esto supone una avance en la obtención de fibras de algodón recicladas con propiedades mecánicas similares a las del algodón virgen.



Figura 8. Preparación del "dope" a escala piloto.

3. **Reciclado químico de poliamida:** en este caso, se ha realizado un estado del arte sobre el reciclado químico de residuos textiles de poliamida, incluyendo las principales tecnologías y su estado de madurez, así como los actores más relevantes que se encuentran actualmente en el mercado. Las tecnologías más estudiadas son la hidrólisis, la glicólisis y la amonólisis para lograr recuperar de manera satisfactoria los monómeros que constituyen la cadena polimérica, siendo estos la caprolactama y la hexametildiamina (HMD). De todas las tecnologías estudiadas, la más utilizada es la hidrólisis, que consiste en la utilización de agua como reactivo para romper las cadenas del polímero. De hecho, la empresa italiana Aquafil utiliza esta tecnología para el desarrollo de sus productos reciclados que ya son comercializados.

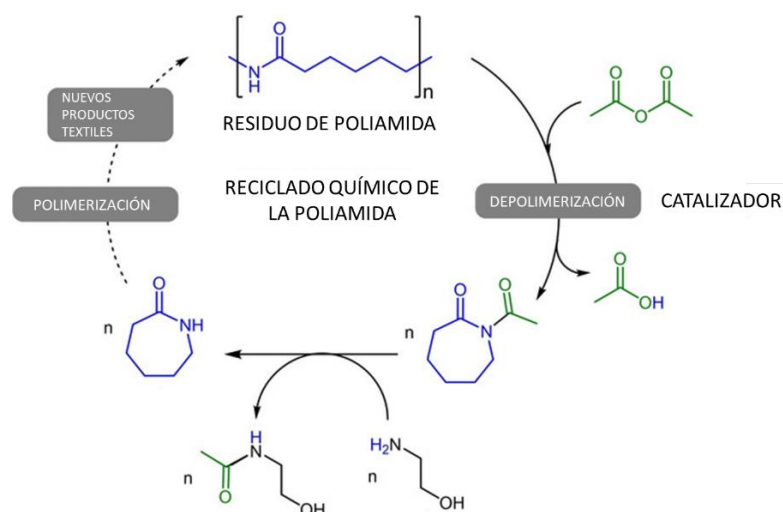


Figura 9. Esquema del reciclado químico de la poliamida

4. **Reciclado termoquímico de residuos textiles:** el reciclado termoquímico de residuos textiles, mediante procesos de pirólisis y gasificación, es una de las tecnologías que más están siendo estudiadas en los últimos años por la comunidad científica para dar solución al reciclado de residuos textiles multicomposición.



Figura 10. Diagrama de las corrientes de entrada y salida del proceso de pirólisis

Además de plantear dicha tecnología para tratar residuos textiles multicomposición, se ha estudiado a nivel teórico, mediante la realización de un estado del arte, su aplicación para reciclar residuos de palas eólicas, ya que hay un gran número de parques eólicos cuyos aerogeneradores están alcanzando el fin de su vida útil, lo que supone una nueva tipología de residuos que gestionar que se caracterizan por sus grandes dimensiones y su resistente estructura. Así, el proceso de “upcycling” de las palas de las turbinas eólicas mediante pirólisis empezaría con el desmantelamiento de las palas eólicas y la reducción de su tamaño para transportar los fragmentos fácilmente hasta las plantas de pirólisis. El proceso llevado a cabo en la planta se representa en la siguiente figura:

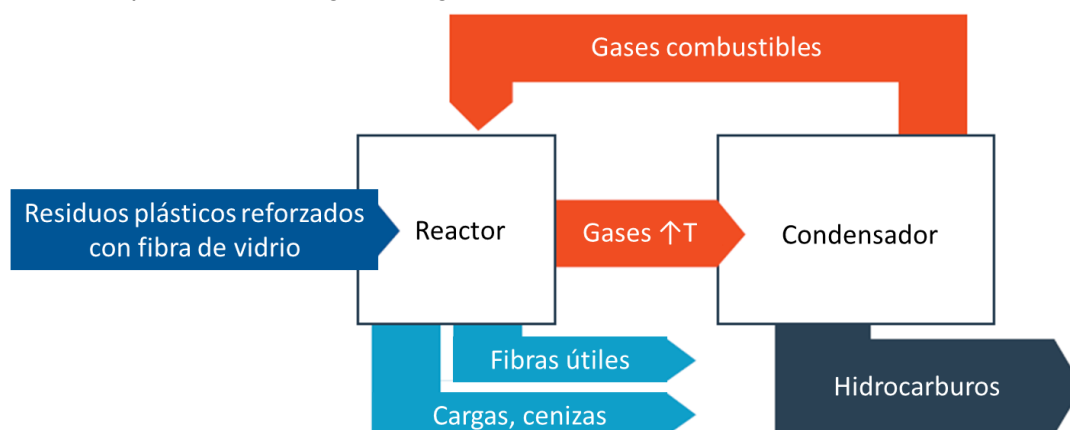


Figura 11. Diagrama del proceso de pirólisis aplicado a palas eólicas.

Tras la obtención de hidrocarburos en el condensador, los productos sólidos que quedan en el reactor son fibras que pueden ser reutilizadas, cargas que contuviera la matriz polimérica y cenizas.

Gracias al conocimiento adquirido, se ha realizado la inversión de un reactor de pirólisis de 10 L de capacidad, lo que permitirá, en los próximos proyectos de investigación, la obtención de combustibles mediante procesos pirolíticos.



6. Impacto empresarial

La ejecución del Proyecto ha permitido la implementación de actividades y tareas asociadas a la transferencia de conocimiento, así como el cumplimiento de los objetivos específicos propuestos relacionados con esta actividad. Más concretamente, gracias al conocimiento generado durante la ejecución del Proyecto, se han llevado a cabo actuaciones con empresas tanto de carácter económico como no económico:

- **Acciones de transferencia económicas:** se ha firmado un Proyecto de colaboración con Repsol S.A. relacionado con la valorización de residuos textiles de poliéster.



- **Acciones de transferencia no económicas:** se han presentado dos proyectos europeos a la convocatoria "LIFE-2023-SAP-ENV". Concretamente, los proyectos se titulan "Advancing sorting-to-reuse&recycle solutions for multicomponent textiles" (número de solicitud: 101148441 y acrónimo "REMTex LIFE") y "Fibre to fibre full circularity in the textile sector through novel polyester recycling technologies" (número de solicitud: 101148221 y acrónimo "LIFE POLITEX").

