



CHEMUP 2025

Reciclado químico de
residuos textiles posconsumo



Contenido

1. Ficha técnica del proyecto	2
2. Antecedentes y motivaciones	3
3. Objetivos del proyecto	4
4. Plan de trabajo	5
5. Resultados obtenidos	6



1. Ficha técnica del proyecto

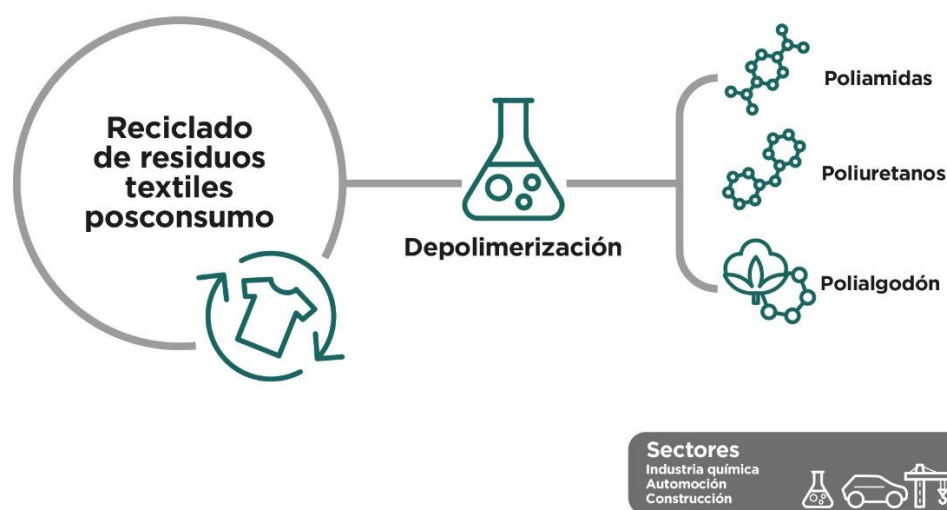
N.º EXPEDIENTE	IMAMCA/2025/6
TÍTULO COMPLETO	Reciclado químico de residuos textiles posconsumo
PROGRAMA	Ayudas dirigidas a centros tecnológicos CV para proyectos de I+D en cooperación con empresas
ANUALIDAD	2025
PARTICIPANTES	
COORDINADOR	
ENTIDADES FINANCIADORAS	IVACE – INSTITUT VALENCIÀ DE COMPETITIVITAT EMPRESARIAL
ENTIDAD SOLICITANTE	AITEX
C.I.F.	G03182870



2. Antecedentes y motivaciones

La industria textil es uno de los sectores más relevantes a nivel global, representando una parte significativa de la economía mundial con un valor estimado de casi 1,3 billones de euros y proporcionando empleo a más de 300 millones de personas a lo largo de toda su cadena de valor. Durante los últimos 20 años, la producción mundial de fibras se ha duplicado, y se espera que continúe creciendo de manera exponencial en los próximos años.

Sin embargo, el sistema actual de producción, distribución y consumo de textiles opera casi exclusivamente bajo un modelo lineal. Este enfoque, combinado con el fenómeno de la "moda rápida", ha generado diversas problemáticas, entre las que destacan: (i) la acumulación de residuos textiles en vertederos o su incineración, (ii) el impacto ambiental significativo del sector, y (iii) la dependencia de recursos importados como el poliéster. De no implementarse cambios en el modelo industrial actual, se proyecta que estas cifras podrían aumentar en al menos un 50% para el año 2030. Solo en España, se estima que los desechos textiles ascienden anualmente a 1.100.000 toneladas, una cifra alarmante que subraya la necesidad de soluciones urgentes y sostenibles. La normativa europea, como el Plan de Acción para la Economía Circular y la Directiva (UE) 2018/851, exige la implantación de sistemas de recogida selectiva de residuos textiles antes de 2025, lo que refuerza la necesidad de soluciones innovadoras.



El reciclado químico surge como una alternativa prometedora frente a los métodos mecánicos, permitiendo descomponer polímeros en sus monómeros originales y generar nuevos productos de alta calidad. CHEMUP 2025 se enmarca en esta estrategia, ampliando el conocimiento adquirido en proyectos anteriores (CHEMUP, CHEMUP II, CHEMUP III y CHEMUP 2024).





3. Objetivos del proyecto

El proyecto CHEMUP 2025 tiene como objetivo principal desarrollar y optimizar procesos avanzados de reciclaje químico para materiales poliméricos, como poliamidas, poliésteres y poliuretanos, favoreciendo su reutilización en aplicaciones industriales, contribuyendo a la economía circular y reduciendo el impacto ambiental.

Objetivos específicos:

- Implementar procesos de despolimerización de poliamidas para recuperar monómeros de alta pureza, evaluando su potencial para nuevas síntesis.
- Desarrollar técnicas de glicólisis para mezclas de poliéster y algodón textil, obteniendo glicolizados para síntesis de poliésteres insaturados y otros productos de valor añadido.
- Ejecutar ensayos de pirólisis y solvólisis en composites para recuperar fibras de vidrio y de carbono, garantizando su integridad y propiedades mecánicas.
- Estudiar la despolimerización de poliuretanos mediante rutas químicas eficientes, estableciendo parámetros para su futura ejecución.
- Evaluar la viabilidad técnico-económica y ambiental de los procesos desarrollados, considerando su impacto en la industria y en la sostenibilidad.
- Desarrollar acciones de transferencia y difusión hacia el sector industrial.



4. Plan de trabajo

CRONOGRAMA

2025												
PAQUETES DE TRABAJO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PT1. GESTIÓN Y SEGUIMIENTO												
ACTIVIDAD 1.1. GESTIÓN Y SEGUIMIENTO DEL PROYECTO												
PT2. EJECUCIÓN TÉCNICA												
ACTIVIDAD 2.1. ESTADO DEL ARTE / VIABILIDAD TÉCNICA / DIAGNÓSTICO DE NECESIDADES												
ACTIVIDAD 2.2. EXPERIMENTAL												
ACTIVIDAD 2.3. CARACTERIZACIÓN												
ACTIVIDAD 2.4. COORDINACIÓN TÉCNICA Y VALIDACIÓN												
PT3. COMUNICACIÓN, DIFUSIÓN Y TRANSFERENCIA DE RESULTADOS												
ACTIVIDAD 3.1. COMUNICACIÓN, DIFUSIÓN Y TRANSFERENCIA DE RESULTADOS.												
PT4. SUPERVISIÓN Y SEGUIMIENTO DEL PROYECTO												
ACTIVIDAD 4.1. SUPERVISIÓN Y SEGUIMIENTO DEL PROYECTO												

PAQUETES DE TRABAJO Y FASES DEL PROYECTO

PT1. GESTIÓN Y SEGUIMIENTO

- ACTIVIDAD 1.1. GESTIÓN Y SEGUIMIENTO DEL PROYECTO

PT2. EJECUCIÓN TÉCNICA

- ACTIVIDAD 2.1. ESTADO DEL ARTE / VIABILIDAD TÉCNICA / DIAGNÓSTICO DE NECESIDADES
- ACTIVIDAD 2.2. EXPERIMENTAL
- ACTIVIDAD 2.3. CARACTERIZACIÓN
- ACTIVIDAD 2.4. COORDINACIÓN TÉCNICA Y VALIDACIÓN

PT3. COMUNICACIÓN, DIFUSIÓN Y TRANSFERENCIA DE RESULTADOS

- ACTIVIDAD 3.1. COMUNICACIÓN, DIFUSIÓN Y TRANSFERENCIA DE RESULTADOS.

PT4. SUPERVISIÓN Y SEGUIMIENTO DEL PROYECTO

- ACTIVIDAD 4.1. SUPERVISIÓN Y SEGUIMIENTO DEL PROYECTO

5. Resultados obtenidos

Como resultado del desarrollo del proyecto CHEMUP 2025, se han consolidado rutas de reciclaje químico en poliamidas, poliéster y algodón, así como validado procesos termoquímicos y de solvólisis para composites reforzados. Los resultados se presentan por objetivo, evidenciando su contribución a: (i) recuperar monómeros o intermedios de alta calidad; (ii) repolimerizar y reintroducir materiales en aplicaciones industriales; y (iii) reducir impactos asociados al residuo y a la materia prima virgen.

5.1. Reciclado químico de composites con fibra de vidrio por solvólisis asistida por microondas

Durante el proyecto se ha evaluado la solvólisis asistida por microondas (MW) como vía avanzada para el reciclado químico de composites reforzados con fibra de vidrio (GFRP). Esta tecnología permite despolimerizar selectivamente la matriz epoxi en condiciones moderadas, recuperando las fibras con un nivel de limpieza adecuado para su posible incorporación en laminados de segunda vida. El calentamiento por microondas ofrece una transferencia energética rápida, homogénea y eficiente, lo que acelera la reacción y mejora el control del proceso.

Se trabajó con dos composites con matriz polimérica epoxi, representativos de dos tecnologías de fabricación: infusión (EP-IN) y pultrusión (EP-PU). Esto permitió analizar la influencia del proceso productivo y de la arquitectura del laminado en la eficacia del reciclado químico. Como paso previo, se determinó el contenido de resina mediante calcinación, estableciendo una base de referencia para el cálculo de los rendimientos de degradación.



Figura 1. Composites de partida: EP-IN (izquierda) y EP-PU (derecha).

El procedimiento experimental consistió en: (i) tratamiento químico asistido por MW en un reactor de laboratorio diseñado para operación segura y reproducible; (ii) separación sólido-líquido; (iii) lavado de las fibras en condiciones suaves (baño acuoso y aclarado orgánico controlado) para retirar residuos del medio; y (iv) secado a temperatura moderada antes de su caracterización morfológica y mecánica.

Los resultados mostraron niveles elevados de degradación de las matrices poliméricas en ambos materiales, con un comportamiento especialmente favorable en el laminado EP-PU, que alcanzó grados de degradación muy altos incluso con tiempos reducidos. Las fibras recuperadas

presentaron coloración uniforme, baja presencia de residuos y buena capacidad de separación del haz, indicando una actuación selectiva del proceso y una limpieza posterior eficaz.



Figura 2. Fibras recuperadas tras solvólisis: comparación EP-IN (izquierda) y EP-PU (derecha).

Las micrografías SEM confirmaron la adecuada limpieza superficial, sin depósitos visibles y sin daños asociados al tratamiento químico. Asimismo, los análisis EDS verificaron la ausencia de residuos del medio de reacción tras el protocolo de lavado, evidenciando una interacción controlada entre la química del proceso y la transferencia térmica.

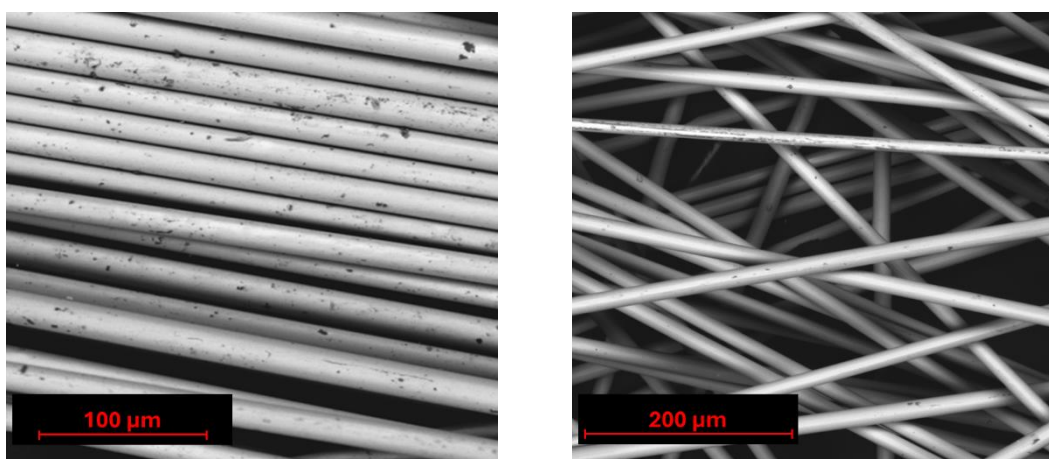


Figura 3. Micrografías SEM/EDS de fibras recuperadas (limpieza superficial y ausencia de residuos).

En cuanto al desempeño mecánico, las fibras recuperadas mostraron reducciones moderadas de resistencia, asociadas principalmente a la modificación del sizing original, mientras que el módulo se mantuvo elevado, siendo especialmente notable en las fibras derivadas del material EP-PU. Estas características permiten plantear su uso en composites de segunda generación, especialmente en aplicaciones donde la rigidez tiene un peso estructural predominante.

En conclusión, la solvólisis asistida por microondas se presenta como una ruta eficaz y técnicamente viable para el reciclado químico de composites reforzados con fibra de vidrio. La tecnología permite recuperar fibras con una superficie limpia y con propiedades mecánicas compatibles con aplicaciones de segunda vida, además de operar bajo condiciones controladas y tiempos optimizables.

5.2. Despolimerización de poliamidas: obtención de monómeros/oligómeros de alta calidad

Se ha abordado la despolimerización de poliamida 6 (PA6) pre-consumo con el objetivo de romper la cadena polimérica y recuperar monómeros e intermedios con perfil funcional compatible con la repolimerización y usos posteriores.



Figura 4. Residuo de poliamida 6.

El planteamiento ha priorizado rutas en medio acuoso y alcohólico en condiciones controladas de reflujo, con especial atención a la influencia de colorantes, cargas y aditivos presentes en el residuo. Para minimizar interferencias en la calidad del producto, se establecieron procedimientos de clarificación y separación (filtraciones, lavados controlados) orientados a reducir impurezas orgánicas e inorgánicas, lo que permite obtener corrientes monoméricas con baja coloración y buen comportamiento frente a etapas posteriores de purificación y repolimerización.



Figura 5. Montaje experimental para la reacción de despolimerización de poliamida 6.

Paralelamente, se han explorado y validado rutas que conducen a caprolactama y a ácido 6-aminocaproico, ambos de interés como monómeros/intermedios en esquemas de re-síntesis. La identidad química de los productos se ha verificado internamente (p. ej., por espectroscopía FTIR),

si bien estos datos analíticos no se publican en el presente documento por su carácter no divulgable. Con el conjunto de ensayos se han delimitado ventanas operativas reproducibles, definido pautas de manejo de subproductos y establecido buenas prácticas de pre-acondicionamiento del residuo, constituyendo una base sólida para el escalado posterior.



Figura 6. Monómero recuperado tras la despolimerización y la purificación.

5.3. Glicólisis de mezclas poliéster/algodón y uso de glicolizados para poliésteres insaturados

En el marco del objetivo de desarrollar técnicas de glicólisis para mezclas PET/CO, se ha abordado la valorización del residuo textil multicomponente mediante una estrategia que combina procesos de disolución y regeneración en líquidos iónicos (IL) con optimización del dope en amasador vertical. Esta aproximación, contemplada como parte de la línea de glicólisis, permite tratar la fracción celulósica (algodón) y mejorar la homogeneidad del sistema, asegurando la compatibilidad con etapas posteriores de separación y aprovechamiento de la fracción poliéster.

Se han realizado ensayos de preparación del dope con IL y algodón, evaluando parámetros críticos como tiempo de mezcla, temperatura y viscosidad, y se ha implementado la hilatura en húmedo (wet spinning) para regenerar fibras continuas. Paralelamente, se ha trabajado en la recuperación del líquido iónico, garantizando la sostenibilidad del proceso y reduciendo el impacto ambiental.



Figura 7. Preparación del dope en amasador vertical.

5.4. Reciclado termoquímico de composites por pirólisis

El proyecto ha evaluado la pirólisis como vía termoquímica para el reciclado de diferentes familias de composites reforzados con fibra de carbono y fibra de vidrio, incluyendo materiales con matrices termoestables (epoxi, poliéster, poliuretano) y residuos ignífugos representativos del sector ferroviario y eólico.

El proceso de reciclado combina una etapa termoquímica en atmósfera inerte, destinada a la degradación controlada de la matriz y la liberación del refuerzo, con una etapa posterior de oxidación moderada orientada a la limpieza del char residual, generado durante la etapa termoquímica, facilitando así su reutilización. La planta piloto emplea un reactor de pirólisis equipado con un sistema de condensación en serie, diseñado para la separación y recuperación diferenciada de las fracciones líquidas generadas durante el proceso.



Figura 8. Planta piloto de pirólisis utilizada para el tratamiento termoquímico de materiales compuestos, con doble reactor y un tren de condensación

Para evaluar el comportamiento del proceso frente a distintos residuos industriales, se trataron diferentes tipologías de composite, lo que permitió estudiar la influencia del tipo de matriz, la densidad de reticulación y el refuerzo sobre la eficiencia del proceso y la calidad de las fracciones recuperadas.

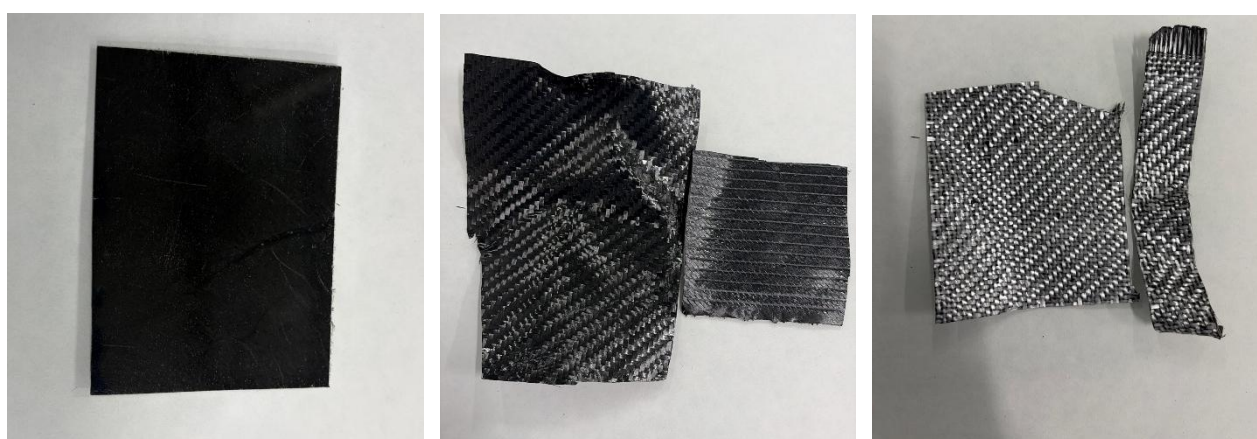


Figura 9. Residuos de composites: de fibra de carbono CFRP (izquierda), ignífugo ferroviario (medio), de fibra de vidrio GFRP (derecha).



A partir de los diferentes trabajos experimentales realizados, se definió una ventana operativa representativa para el proceso, con temperaturas características de la pirólisis de materiales termoestables, situadas generalmente entre 400 y 600 °C. Estas condiciones se aplicaron junto con rampas de calentamiento moderadas y tiempos de residencia intermedios, suficientes para asegurar la eliminación progresiva de la matriz sin comprometer la integridad del refuerzo. Tras la etapa termoquímica, se aplicó una oxidación controlada ajustando caudal y composición del gas para eliminar el char adherido, manteniendo un equilibrio adecuado entre la limpieza del material recuperado y la conservación de sus propiedades mecánicas.

Los rendimientos obtenidos reflejan las variaciones esperables en residuos multicomponente tratados mediante procesos termoquímicos. A continuación, se resumen los rangos observados, por familia de residuo.

CFRP – Matriz epoxi

- Fracción combinada sólida + líquida: 20–50 % en peso
- Dependencia marcada de la rampa térmica y la condensación
- Buena liberación del refuerzo tras optimización inicial

CFRP – Matriz poliéster

- Fracciones sólida y líquida: 20–40 % en peso
- Tiempos de residencia menores permiten mantener rendimientos líquidos
- Proceso compatible con reciclado repetitivo

GFRP – Residuos de palas eólicas

- Fracción sólida: 40–60 %
- Fracción líquida: 5–20 %
- Resultados coherentes con resinas termoestables viniléster/epoxi

GFRP – Residuos ignífugos ferroviarios

- Fracción líquida: <20 % (alto contenido en gases no condensables)
- Fracción sólida: 30–60 %
- Requiere oxidación adicional para eliminar el char resistente

Las fibras recuperadas tras pirólisis y oxidación mostraron un estado superficial adecuado para su reutilización, siempre que se controle la severidad de la oxidación. Los análisis externos sobre la fracción sólida (CHNS y análisis inmediato) indicaron altos contenidos en carbono y bajos niveles de humedad/volátiles, especialmente en los CFRP.

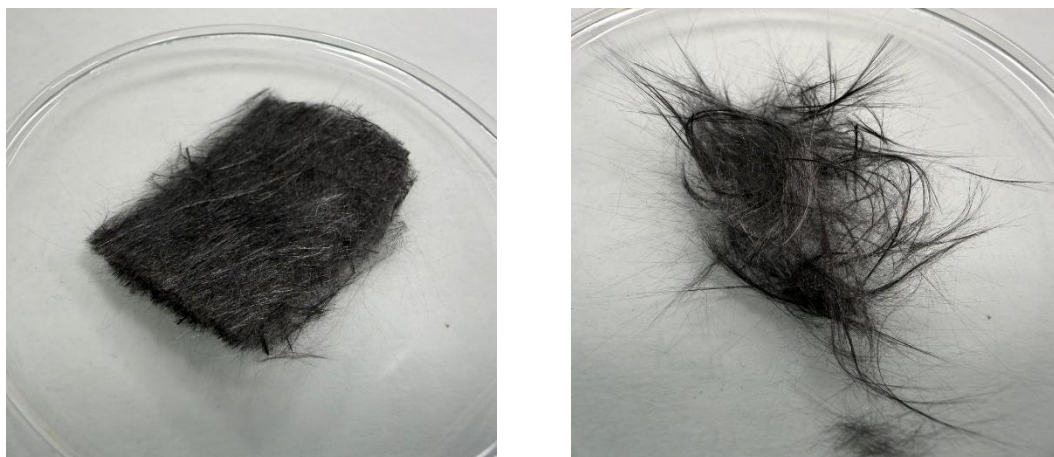


Figura 10. Fibras recuperadas en bloque (izquierda) y abierta (derecha).

En cuanto a la fracción líquida, los diferentes estudios analíticos (carácter elemental, poder calorífico, análisis cromatográfico) han mostrado que se trata de una mezcla mayoritariamente aromática y nitrogenada, con un poder calorífico elevado, lo que respalda su potencial para valorización energética y, previo fraccionamiento o purificación, su posible aprovechamiento químico.



Figura 11. Aceite pirolítico obtenido tras condensación.

La fracción gaseosa mostró un perfil típico de pirólisis de termoestables, con presencia de H_2 , CH_4 , CO/CO_2 e hidrocarburos ligeros C_2-C_5 , y un poder calorífico elevado, lo que la convierte en una opción de interés para autoconsumo energético tras depuración.

Finalmente, el conjunto de ensayos permite destacar tres aprendizajes operativos clave:

- **Rampas moderadas + condensación escalonada** → mayor recuperación de fracciones líquidas.
- **Tiempos intermedios en pirólisis y oxidación** → equilibrio entre productividad, limpieza y preservación del refuerzo.
- **Aumento de severidad térmica** → más fracción gaseosa a costa de sólido/líquido; decisión dependiente del objetivo (materia vs. energía).