Reciclado Químico en España:

Apostando por un futuro circular

Informe realizado por:

AIMPLAS

PLASTICS EUROPE
Enabling a sustainable future

feiQue
Federación Empresarial de la Industria Química Española

Reciclado Químico en España:

Apostando por un futuro circular

PLASTICS EUROPE
Enabling a sustainable future

feiQue
Federación Empresarial de la Industria Química Española

Informe realizado por: AIMPLAS

Con el apoyo de: EsPlásticos · SUSCHEM ES Química Sostenible · forética · Foro Química y Sociedad · RSE · Smart Chemistry Smart Future · EXPOQUIMIA Encuentro Internacional de la Química · EQUIPLAST Encuentro Internacional del Plástico y el Caucho

© 2022

Índice

RESUMEN EJECUTIVO/ *EXECUTIVE SUMMARY* **4**

PRINCIPALES CONCLUSIONES **9**

1 Los materiales plásticos **10**

1.1 Plásticos: polímeros y aditivos 10

1.2 Sectores de aplicación de los plásticos 12

2 Los residuos plásticos y su conversión a recursos **13**

2.1 Residuos plásticos y valorización 13

2.2 Marco legislativo 15

3 Reciclado químico: descripción general y tecnologías asociadas **19**

3.1 Jerarquía de residuos y reciclado químico 19

3.2 Tipos de reciclado químico 21

3.3 Otros procesos de valorización y su complementariedad 24

3.4 Retos del reciclado químico 26

4 Contabilidad y Trazabilidad del Plástico Reciclado Químicamente: Balance de Masas **27**

4.1 Definición y aplicaciones 27

4.2 Balance de masas aplicado a un proceso de pirólisis 30

4.3 Balance de masas aplicado a un proceso de solvólisis 31

5 Estado del arte en España **32**

5.1 Empresas de reciclado químico 32

5.2 Proyectos de I+D+i de reciclado químico 37

5.3 Patentes de reciclado químico 39

6 Tendencias del reciclado químico **42**

7 Marco necesario para que el desarrollo del reciclado químico sea una realidad **44**

8 Los 10 mitos del reciclado químico **48**

Abreviaturas **50**

Glosario **51**

Relación de Figuras **52**

Relación de Tablas **53**

Anexos **54**

Anexo I: Certificaciones de Balance de Masas **54**

Anexo II: Ejemplos de proyectos financiados de reciclado químico de plásticos con participación de entidades españolas **55**

Anexo III: Ejemplos de Centros de Investigación Nacionales referentes en reciclado químico de plásticos **57**

RESUMEN EJECUTIVO
EXECUTIVE SUMMARY

Los plásticos son materiales de gran valor y utilidad para la industria, la economía y la sociedad en general. Actualmente están presentes en todos los sectores de aplicación y contribuyendo con ello a la sostenibilidad por sus características innatas.

Al final de su vida útil, los productos fabricados con materiales plásticos se convierten en residuos que deben ser gestionados y reciclados adecuadamente para recuperarlos e introducirlos nuevamente en el proceso productivo, favoreciendo así la transición hacia una economía circular.

Existen diferentes tecnologías de reciclado: mecánico, por disolución y químico. **La unión y complementariedad de estas tecnologías son palancas para alcanzar los objetivos de sostenibilidad, circularidad y neutralidad climática de la UE y de la propia industria.**

El reciclado químico es el conjunto de tecnologías que permite descomponer los residuos plásticos y otros polímeros procedentes de diferentes flujos de residuos en sus componentes básicos para transformarlos en valiosas materias primas secundarias entre los que se encuentran monómeros y oligómeros, que se utilizan como punto de partida para producir nuevos productos químicos y polímeros circulares.

Plastics are materials of great value and extremely useful for the industry, the economy and for society as a whole. They are currently present in all application sectors, thus contributing to sustainability thanks to their intrinsec characteristics.

At the end of their service life, products made of plastic materials become waste and must be properly managed and recycled in order to recover them and reintroduce them back into manufacturing processes, thus fostering the transition towards a circular economy.

There are different recycling technologies: mechanical, dissolution and chemical. ***The combination and complementarity of these technologies are levers to achieve the EU's and industry's own objectives of sustainability, circularity and climate neutrality.***

Chemical recycling is the set of technologies that allows breaking down waste plastics and other polymers from different waste streams into their basic components to trasnform them into valuable secondary raw materials, including monomers and oligomers which are used as strating point for the production of new chemicals and circular polymers.

El reciclado químico no sustituye sino que complementa al reciclado mecánico abriendo nuevas posibilidades de gestión de los residuos plásticos

Estos nuevos productos químicos y polímeros circulares presentan las mismas características que los obtenidos de fuentes vírgenes, siendo una buena oportunidad para la fabricación de productos que requieran altas prestaciones y elevados estándares de calidad.

Actualmente, los residuos plásticos mezclados o que están potencialmente contaminados se depositan en vertederos o se incineran, al no poder ser reciclados mecánicamente. El reciclado químico se convierte en una solución para este tipo de residuos.

Esta tecnología incipiente abre nuevas posibilidades de gestión de los residuos plásticos, siendo una tecnología complementaria al reciclado mecánico. **Sin embargo, aún tiene importantes retos** por delante que deben ser superados, en algunos casos, mediante mejoras en los propios procesos.

Las tecnologías que se utilizan para reciclar químicamente los residuos plásticos son muy variadas, dependiendo del agente que produce la ruptura de la cadena. Existen tres procesos de craqueo principales: térmico, químico y biológico. Como resultado de cualquiera de estos procesos se obtienen productos y materiales de amplia aplicación. En aquellos casos en los que se obtiene energía o se usa de manera directa como combustible, se consideran procesos de valorización energética y no de reciclado, situándose a diferente nivel, según la jerarquía de residuos.

These new products have the same characteristics as virgin materials and are a good opportunity for the manufacturing of products requiring high performance and high quality standards.

Currently, mixed or potentially contaminated plastic waste is landfilled or incinerated, as it cannot be mechanically recycled. Chemical recycling becomes a solution for this type of waste.

***This emerging technology opens up new possibilities for the management of plastic waste**, as a complementary technology to mechanical recycling. **However, there are still significant challenges** ahead that need to be overcome, in some cases, through improvements in the processes themselves.*

The technologies used to treat plastic waste via chemical recycling are very diverse, depending on the chain-breaking agent. There are three main processes: thermal cracking, chemical cracking and biological cracking. All of them result in products and materials of wide application. In those cases where energy is obtained or used directly as fuel, they are considered as energy recovery processes, not recycling processes, standing at a different level, according to the waste hierarchy.

Chemical recycling does not replace but complements mechanical recycling by introducing new possibilities for plastic waste management

Las inversiones anunciadas en España permitirán multiplicar por 40 las capacidades de tratamiento de residuos por reciclado químico, alcanzando el medio millón de toneladas en 2025

Hay procesos que pueden combinar la obtención de energía y la obtención de sustancias. Por esta razón, junto con la propia necesidad de una trazabilidad clara para procesos que son similares a los de la propia industria química, se requiere una **metodología certificable y reconocida como es el balance de masas.**

Todas estas tecnologías de reciclado químico están aún poco implantadas a nivel industrial en el territorio nacional, de forma similar a lo que ocurre en el resto de Europa. Sin embargo, el gran número de empresas interesadas en desarrollar este tipo de proyectos, el incremento del número de patentes relacionadas, la gran diversidad de proyectos de I+D+i al respecto, el elevado número de entidades de investigación que trabajan en estos temas y la propia necesidad de tener más cantidad de materiales plásticos reciclados, entre otras razones, permiten augurar un crecimiento muy significativo del reciclado químico en los próximos años en nuestro país. Las inversiones anunciadas en España permitirán multiplicar por 40 las capacidades de tratamiento de residuos por reciclado químico.

There are processes that can combine the production of both energy and substances. For this reason, together with the need for clear traceability for processes that are similar to those of the chemical industry itself, ***a certifiable and recognised methodology such as mass balance is required.***

All these chemical recycling technologies are not yet widely implemented at industrial level *in Spain, as in the rest of Europe. However, the large number of companies interested in developing this type of projects, the increasing number of related patents, the great diversity of R&I projects in this area, the large number of research organisations working on this topic together with the need to have more recycled plastic materials, among other reasons, allow us to predict a very significant growth of chemical recycling in the coming years in our country. In fact, it is estimated that the investments announced in Spain will allow the waste treatment capacity via chemical recycling to be multiplied by 40, reaching almost half a million tonnes by 2025.*

The investments announced in Spain will allow a 40-fold increase in waste treatment capacity via chemical recycling, reaching almost half a million tonnes by 2025

Una vez demostrada su viabilidad técnica, las inversiones necesarias para la implementación de estas tecnologías a escala industrial requieren de medidas que favorezcan la innovación para la mejora de la eficiencia de estos procesos y de un marco normativo estable y armonizado que genere seguridad jurídica y claridad en los flujos de residuos, en términos de cantidad y calidad, con homogeneidad en los criterios de condición de fin de residuo tanto a nivel europeo como nacional. De esta forma, se podrá facilitar que los residuos plásticos y/o poliméricos que actualmente se incineran, se depositan en vertederos o se desperdician -generando nulo valor añadido-, se puedan reciclar en nuevas materias primas circulares para producir plásticos u otros productos químicos.

España ha sido el primer país de la Unión Europea en incluir el reciclado químico en un documento legislativo (Ley de Residuos y Suelos Contaminados para una Economía Circular) y en aprobar una Proposición no de ley para promover el uso de productos valorizados por procesos de reciclado químico de plásticos. Esto supone un primer paso para el amplio despliegue de estas tecnologías y para la atracción de inversiones productivas a nuestro país.

Este avance a nivel regulatorio va acompañado de una industria química española y un sector de los plásticos fuertes y consolidados, comprometidos con la economía circular y con capacidad de ofrecer soluciones innovadoras en todas las etapas del ciclo de vida de los productos plásticos.

Esto, unido a la existencia de una cadena de valor consolidada y bien coordinada, que incluye desde los fabricantes de materias primas, a los transformadores de materiales plásticos y a los recicladores mecánicos, entre otros, hace que nuestro país esté en una situación inmejorable para que el reciclado químico tenga potencial para ser una realidad a nivel industrial que permita **acelerar la circularidad de los plásticos y alcanzar las tasas de reciclado marcadas por la Unión Europea.**

Once their technical feasibility has been proved, the necessary investments for the implementation of these technologies at industrial scale require measures that favour innovation to improve the efficiency of these processes and a stable and harmonised regulatory framework that generates legal certainty and clarity in waste streams, in terms of quantity and quality, with homogeneity in the criteria for end-of-waste status at both European and national level. This will make it easier for plastic and/or polymer waste that is currently incinerated, landfilled or wasted - generating no added value - to be recycled into new circular feedstocks for the production of plastics or other chemicals.

***Spain has been the first country in the European Union to include chemical recycling in a piece of legilslation (Law on Waste and Contaminated Land for a Circular Economy) and to approve a non-law proposal to promote the use of recovered products from chemical recycling processes for plastics**. This is a first step for the widespread deployment of these technologies and for the attraction of productive investments in our country. attracting productive investment to our country.*

*This progress at regulatory level is accompanied by a strong and consolidated spanish chemical industry and plastics sector, committed to circular economy and with the capacity to offer innovative solutions at all stages of the life cycle of plastic products. This, together with the existence of a consolidated and well-coordinated value chain, which includes raw material producers, plastic material converters and mechanical recyclers, among others, places our country in an outstanding position for chemical recycling to have the potential to become a reality at industrial level allowing us **to accelerate the circularity of plastics and reach the recycling rates set by the European Union.***

España es el primer país de la Unión Europea en incluir el reciclado químico en un documento legislativo (Ley de Residuos y Suelos Contaminados para una Economía Circular)

Para que el reciclado químico se implante de manera fehaciente en nuestro país, la **colaboración público-privada**, junto con el resto de agentes de la cadena de valor, resulta una condición fundamental, **como también lo es contar con un marco regulatorio estable y predecible que defina el reciclado desde la neutralidad tecnológica.**

Este documento se completa con una descripción de los 10 mitos que actualmente existen en torno al reciclado químico que deben ser rebatidos con argumentos científicos puesto que dan pie a prejuicios sin fundamento sobre estas tecnologías.

En resumen, este informe ofrece una visión general presente y futura de la industria del reciclado químico en España y su potencial contribución a la economía circular y la neutralidad climática.

For chemical recycling to be reliably implemented in our country, public-private collaboration, together with other actors of the value chain in the value chain, is a fundamental condition, ***together with the need for a stable and predictable regulatory framework that defines recycling from the standpoint of technological neutrality.***

This document is completed with a description of the 10 myths that currently exist around chemical recycling, which must be refuted with scientific arguments as they lead to unfounded prejudices about these technologies.

In summary, this report provides an overview of the present and future of the chemical recycling industry in Spain and its potential contribution to the circular economy and climate neutrality.

Spain is the first country in the European Union to include chemical recycling in a piece of legislation (Law on Waste and Contaminated Land for a Circular Economy)

PRINCIPALES CONCLUSIONES

1 Para alcanzar las ambiciones del Pacto Verde Europeo en materia de circularidad (reciclado y contenido de reciclado) y neutralidad climática, es necesario contar con el reciclado químico como complemento al reciclado mecánico.

2 España dispone de un ecosistema de I+D+i especialmente propicio para el desarrollo de las diferentes tecnologías de reciclado químico. El fomento de la colaboración público-privada a lo largo de la cadena de valor, junto con un marco favorable que atraiga inversiones, puede propiciar que nuestro país se posicione como referente mundial en este tipo de tecnologías de reciclado.

3 Las inversiones proyectadas por la industria en España, van a permitir que se multipliquen por 40 las capacidades de tratamiento de residuos mediante reciclado químico, alcanzando casi el medio millón de toneladas en 2025.

4 Las diferentes tecnologías de reciclado químico son prometedoras, pero aún son incipientes, por lo que necesitan tiempo para escalar los proyectos y poder demostrar su viabilidad técnico-económica antes de alcanzar su pleno potencial a nivel industrial.

5 Para que el reciclado químico sea una realidad a escala industrial, es necesario un marco regulatorio estable y predecible que defina el reciclado desde la neutralidad tecnológica.

6 Si bien España es el primer país europeo que ha incorporado el reciclado químico en su ordenamiento jurídico, aún es necesaria una definición clara y armonizada de reciclado químico, desarrollar criterios claros de fin de condición de residuo y que se reconozca el Balance de Masas como metodología de trazabilidad del contenido en reciclado procedente de estas nuevas tecnologías.

1 Los materiales plásticos

1.1 Plásticos: polímeros y aditivos

Los plásticos constituyen una familia de materiales con una gran versatilidad y propiedades muy diversas tales como ligereza, aislamiento o conductividad, transparencia u opacidad, resistencia a la corrosión y agentes químicos, durabilidad en uso o biodegradabilidad, entre otras, lo que los convierte en unos materiales únicos.

Esta versatilidad y combinación de propiedades es posible gracias a la elección adecuada de los diferentes componentes que están presentes en un plástico: polímeros y aditivos.

Los polímeros son grandes moléculas (macromoléculas), formadas por la repetición de varias unidades constitucionales llamadas monómeros.

Ejemplo de estructura de polímeros | FIG 1

La reacción química a partir de la cual los monómeros se unen para obtener un polímero se denomina reacción de polimerización. Este tipo de reacción puede ser de dos tipos: polimerización por adición (poliadición) y polimerización por condensación (policondensación).

En una reacción de poliadición, los monómeros se adicionan unos con otros, de tal forma que el polímero resultante contiene todos los átomos del monómero inicial. Los polímeros sintetizados mediante este proceso se denominan polímeros de adición.

Ejemplo de reacción de polimerización por adición | FIG 2

Algunos ejemplos de polímeros de adición son: polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) o policloruro de vinilo (PVC).

En una reacción de policondensación, se unen monómeros con grupos funcionales reactivos, liberándose en dicha unión una molécula de pequeño tamaño, normalmente de agua. Así, el polímero resultante, llamado polímero de condensación, no contiene todos los átomos del monómero inicial.

Algunos ejemplos de polímeros de condensación son: poliamida (PA), polietilentereftalato (PET) o policarbonato (PC).

Ejemplo de reacción de polimerización por condensación | FIG 3

De forma adicional, y teniendo en cuenta la naturaleza del polímero, estos se pueden clasificar en tres grandes grupos: termoplásticos, termoestables y elastómeros.

Estructura por tipo de polímero, de izquierda a derecha: termoplástico, termoestable y elastómero | FIG 4

Algunos polímeros termoestables son: resinas de poliéster insaturado (como la resina de poliéster ortoftálica o la resina de poliéster isoftálica) y algunos poliuretanos (PU)

Los polímeros termoplásticos son cadenas lineales o ramificadas que permanecen unidas mediante fuerzas intermoleculares. Cuando se aumenta la temperatura, se reblandecen y funden, y al enfriarse se solidifican; estos ciclos de reblandecimiento-fusión-solidificación pueden repetirse varias veces, por lo que son polímeros aptos para ser reciclados mecánicamente.

Algunos polímeros termoplásticos son: Polietileno (PE), poliestireno (PS), poliamida (PA) o policarbonato (PC), entre otros.

Los polímeros termoestables son aquellos cuya estructura está conformada por cadenas que se disponen formando una red tridimensional muy entrecruzada y se mantienen unidas entre sí mediante enlaces covalentes. Una vez formada la red, no se funden, ni se disuelven, ni se transforman mediante procesos convencionales, por lo que no se pueden reciclar mecánicamente para obtener nuevos polímeros reciclados.

Algunos polímeros termoestables son: resinas de poliéster insaturado (como la resina de poliéster ortoftálica o la resina de poliéster isoftálica) y algunos poliuretanos (PU).

Por último, los polímeros elastoméricos son cadenas lineales que presentan algunos puntos de unión entre ellas, generalmente de carácter covalente, lo que les confiere un comportamiento elástico. Esta familia de polímeros presenta bajo grado de entrecruzamiento, a diferencia de los polímeros termoestables. Son materiales que no se funden ni se disuelven y en presencia de disolventes suelen sufrir hinchamiento. El reciclado mecánico es posible, aunque más complejo que en materiales termoplásticos.

Algunos polímeros elastoméricos son la silicona o el caucho.

El reciclado químico se puede aplicar tanto en polímeros termoplásticos, como en termostables o en elastoméricos.

Para dar solución a las diferentes prestaciones requeridas por estos materiales en sus distintas aplicaciones y para obtener o mejorar determinadas propiedades, se añaden distintas clases de aditivos a los polímeros. Normalmente, el porcentaje de aditivos en las formulaciones de polímeros es bajo, entre 0,5% y 5%, aunque hay aditivos como los retardantes de llama o los plastificantes, que pueden requerir porcentajes más elevados para ciertas aplicaciones, en torno al 30-40%.

Las características que aportan los aditivos al plástico final son muy variadas y aportan diferentes funciones, tal como se refleja en la siguiente tabla:

Uso de aditivos en materiales plásticos y función que aportan | TABLA 1

Aditivo	Función
Estabilizantes y lubricantes	Facilitan el procesado
Plastificantes y cargas de refuerzo	Modifican las propiedades mecánicas
Agentes antiestáticos y agentes antiadherentes	Modifican las propiedades superficiales
Pigmentos y colorantes	Modifican las propiedades ópticas
Estabilizantes UV	Protegen contra los rayos UV y contra el envejecimiento
Fungicidas y biocidas	Protegen contra los agentes biológicos

España es el quinto país con mayor demanda de plásticos, representando un 7,4% del total europeo

1.2 Sectores de aplicación de los plásticos

Los materiales plásticos están presentes en todos los sectores, siendo el mayoritario el sector de envases, seguido por el de la edificación y construcción y en tercer lugar el de la automoción.

En el año 2020, se produjeron en el mundo 367 millones toneladas de plástico[1]; casi un 15% tuvo su origen en Europa. En este continente, la demanda de materiales plásticos para su transformación fue, en este mismo año, de 49,1 millones de toneladas. España es el quinto país con mayor demanda de estos materiales, representando un 7,4% del total europeo.

Los materiales plásticos, a través de sus aplicaciones, contribuyen al desarrollo sostenible en los diferentes sectores. Por ejemplo, el aligeramiento de piezas en el sector de la automoción permite rebajar el peso total del vehículo, minimizando el consumo de combustible reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero, tal y como sucede en el sector de la construcción al incorporar materiales aislantes plásticos para mejorar la eficiencia energética de los edificios. Por su parte, los invernaderos y los sistemas de riego, ambos fabricados con plástico, consiguen ahorros importantes en el consumo de agua.

Demanda de plásticos por parte de transformadores de los Estados miembros de la Unión Europea, Reino Unido, Noruega y Suiza | FIG. 5

Fuente: Plastics Europe[1].

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

2 Los residuos plásticos y su conversión a recursos

2.1 Residuos plásticos y valorización

Una vez terminada la vida útil de un producto, éste se convierte en residuo. En el caso de los productos plásticos, es importante entender las diferentes aplicaciones de estos materiales y su vida útil media para poder abordar la gestión de sus residuos. En este sentido, aproximadamente el 60% de las aplicaciones de los plásticos presentan una vida útil entre uno y cincuenta años. En el caso de los plásticos utilizados en el sector del envase y embalaje, la vida útil es significativamente menor por lo que suelen convertirse en residuos en periodos más cortos de tiempo.

Los residuos plásticos son un reflejo del uso de este material en numerosas aplicaciones y sectores, y suponen el 1% de todos los residuos posconsumo[2] de todos los Estados miembros de la Unión Europea junto con Reino Unido, Noruega y Suiza.

La correcta gestión de los residuos plásticos es clave para avanzar hacia una mayor sostenibilidad. El primer paso es realizar un consumo responsable y sostenible de los mismos, y una vez utilizados, se debe realizar una gestión adecuada para su aprovechamiento como recursos y así favorecer la transición hacia una economía circular.

En el año 2020, más de 29 millones de toneladas de residuos plásticos posconsumo fueron recogidos en Europa[3] de los cuales el 34,6% fue reciclado, el 42% fue valorizado energéticamente y el resto, 23,4%, fue eliminado en vertedero.

La evolución de estos datos a nivel europeo en los últimos 15 años, ha sido positiva desde el punto de vista ambiental y económico produciéndose un incremento de más del 115% del reciclado de residuos plásticos posconsumo y una disminución de más del 45% de eliminación de los mismos.

Residuos plásticos posconsumo recogidos en España (2021) | FIG. 6

Fuente: Plastics Europe

2 La economía circular de los plásticos. Una visión europea. Plastics Europe
3 Plastics Europe. Plastics - the Facts 2021 An analysis of European plastics production, demand and waste data

En España, en 2020, se recogieron 2.567 kt de residuos plásticos posconsumo, de los cuales se reciclaron un 43% (1.106 kt). A pesar de las buenas tasas de reciclado, no puede perderse de vista el hecho de que el 57% restante terminan en vertedero (36%) o siendo valorizados energéticamente (21%), lo cual tampoco es óptimo ya que no se aprovecha el valor intrínseco del plástico. Respecto a la evolución, en los últimos 13 años, el reciclado ha aumentado más de un 120%; este aumento ha sido menor, aunque muy significativo, en el caso de la valorización energética, con un incremento de alrededor del 75%.

La gestión de los residuos varía mucho entre países, debido principalmente a tres factores:

1. Sistemas de recogida de residuos
2. Infraestructuras
3. Implicación de los ciudadanos/consumidores

La actual legislación europea vigente[4], restringe el volumen de residuos que pueden ser depositados en vertedero, algo que está provocando, y seguirá haciéndolo en los próximos años, un cambio de tendencia en cuanto al tratamiento de estos residuos a favor de otros procesos de valorización. Esta situación favorece la aparición de nuevos procesos de reciclado que hasta ahora no se consideraban viables y que permitirán alcanzar unos objetivos ambiciosos a la par que necesarios.

Evolución de la gestión de residuos plásticos en España | FIG. 7

Fuente: Plastics Europe

Para alcanzarlos, resulta necesario establecer un enfoque holístico de los residuos plásticos, trabajando de forma activa en cinco grandes áreas:

1. Prevención y consumo responsable.
2. Eco-diseño.
3. Innovación y desarrollo tecnológico.
4. Alianzas y cooperación a lo largo de la cadena de valor.
5. Cambio del comportamiento del consumidor.

Para poder desarrollar plenamente el potencial de los plásticos en una economía circular, se requiere una combinación de medidas legislativas, inversiones en tecnologías innovadoras e iniciativas sectoriales que hagan posible este cambio sistémico de modelo.

4 Directiva (UE) 2018/850 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos.

2.2 Marco legislativo

El marco legal vigente tanto a nivel nacional como europeo ha influido de manera clara en la evolución de los residuos y su tratamiento.

Uno de los aspectos clave es la necesidad de una política de residuos que aplique el denominado principio de jerarquía, contribuyendo así a la implantación de modelos económicos circulares.

El principio de jerarquía de residuos fue establecido en la Directiva Marco de Residuos[5]. Se trata de un instrumento que permite disociar la relación existente entre el crecimiento económico y la producción de residuos, explicitando el orden de prioridad en las actuaciones en materia de residuos. El fin que persigue la aplicación de esta jerarquía es transformar a la Unión Europea en una sociedad más eficiente en el uso de sus recursos y que contribuya a la lucha contra el cambio climático.

Desde un punto de vista más global, en el año 2015 la Comisión Europea, publicó el denominado Plan de Acción de la UE para una Economía Circular[6] en el que establecía 54 medidas que se consideraban necesarias para avanzar en la transición hacia una economía circular. Estas medidas afectan a las diferentes etapas del ciclo de vida de los productos: diseño y producción, consumo, gestión de residuos y aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos y su reintroducción en el ciclo productivo.

Además, se identificaron cinco áreas que se consideraron prioritarias: los plásticos, el desperdicio alimentario, las materias primas críticas, la construcción y la demolición y la biomasa y productos con base biológica.

Siendo una de las áreas estratégicas de este Plan el plástico, la Comisión Europea lanzó en 2018 la Estrategia Europea para el Plástico[7], que pretende transformar la manera en que los productos fabricados con materiales plásticos son diseñados, producidos, usados y reciclados, incluyendo cuatro medidas principales:

- Mejora de la economía y la calidad del reciclado de plásticos.
- Reducción de la cantidad de residuos plásticos y su abandono en el medioambiente.
- Aumento de la innovación y la inversión.
- Esfuerzos para crear una acción global.

Jerarquía de residuos | FIG. 8

5 Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas directivas.
6 COM(2015) 614 final Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones "Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular"
7 COM(2018) 28 final Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones "Una estrategia europea para el plástico en una economía circular"

Uno de los objetivos que establece esta estrategia es introducir 10 millones de toneladas de plástico reciclado en el mercado europeo en el año 2025.

Para promover este mercado de plásticos reciclados y alcanzar esas tasas se constituyó la *Circular Plastics Alliance (CPA)*, una iniciativa que abarca toda la cadena de valor de los plásticos. Con más de 300 organizaciones que representan a la industria, el sector académico y autoridades, esta alianza está vinculada a los compromisos voluntarios de la industria. En un estudio de la CPA[8] se indica que, para alcanzar el objetivo de 10 millones de toneladas de plástico reciclado en el año 2025, deberían llegar a los centros de clasificación y a las plantas de reciclaje europeas 16,7 y 11,8 millones de toneladas de residuos respectivamente. Los productos reciclados a partir de estos residuos deben tener una calidad adecuada para satisfacer las necesidades del mercado final.

Posteriormente, en el año 2020, la Comisión Europea adoptó un Nuevo Plan de Acción[9] para la Economía Circular por una Europa más limpia y más competitiva, relacionado con el crecimiento sostenible y que tiene como objetivos:

- Hacer que los productos sostenibles sean la norma en la UE.
- Empoderar a los consumidores y a los compradores públicos.
- Centrarse en los sectores que utilizan más recursos y en los que el potencial de circularidad es más elevado, como: electrónica y TIC, productos químicos, baterías y vehículos, embalajes, plásticos, textiles, construcción y edificios, alimentos, agua y nutrientes.
- Garantizar que se generan menos residuos.
- Hacer que la circularidad funcione para las personas, las regiones y las ciudades.
- Dirigir los esfuerzos mundiales en materia de economía circular.

El impulso de la transición mediante la investigación, la innovación en nuevos modelos de negocio circulares y nuevas tecnologías de producción y reciclado, incluida

8 Circular Plastics Alliance. Design for recycling work plan. Updated final draft – Version Sept. 2021.
9 COM(2020) 98 final Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones "Nuevo Plan de acción para la economía circular por una Europa más limpia y más competitiva"

Uno de los objetivos que establece esta estrategia es introducir 10 millones de toneladas de plástico reciclado en el mercado europeo en el año 2025

la exploración del potencial del reciclado químico, es uno de los aspectos principales de este plan para conseguir que los recursos se mantengan durante más tiempo en el ciclo productivo.

Esta cuestión también parece estar alineada en cierta extensión con la implantación del reciclado químico, pues permite obtener productos de alta calidad y estimula el desarrollo de tecnologías que permiten lidiar con problemas de contaminación en materiales reciclados y/o la presencia de sustancias heredadas.

Según el informe *"Roadmap to 10 Mt recycled content by 2025"*[10] recientemente publicado por la CPA, existen tres obstáculos principales que debemos superar para obtener una mayor cantidad de plásticos reciclados en Europa:

- La calidad adecuada de los plásticos reciclados, adaptados a los requisitos de su aplicación.
- La disponibilidad y seguridad de suministro de plásticos reciclados.
- La competitividad (atractivo y aceptación social) de los plásticos reciclados frente a los vírgenes.

Para superar estos retos, esta hoja de ruta plantea a su vez cuatro áreas de acción:

- Mejorar el diseño de productos plásticos.
- Aumentar la recogida de residuos plásticos y mejorar la calidad de la clasificación.
- Invertir en el desarrollo y despliegue de mejores tecnologías de reciclaje.
- Apoyar estructuralmente la demanda de contenido reciclado.

Recientemente en España se ha publicado con fecha de 9 de abril de 2022 la Ley 7/2022 de residuos y suelos contaminados para una economía circular[11], que, entre otras competencias, regula la gestión de residuos.

Esta Ley cuenta, no sólo con la transposición de algunas de las medidas de la Directiva de reducción del impacto de determinados productos de plástico en el medioambiente[12] y de la Directiva de residuos[13], sino que además plantea nuevas propuestas, como las dirigidas a favorecer la transición a una economía circular, la prevención y reducción del impacto de determinados productos de plástico en el medioambiente, la agilización en la declaración de fin de condición de residuo, nuevos objetivos de reciclado por tipo de material (para plástico: 55% en 2030) y la creación de medidas fiscales entre las que se encuentra la implantación de dos nuevos impuestos: un impuesto sobre el depósito de residuos en vertederos, la incineración y la coincineración de residuos y otro sobre los envases de plástico no reutilizables de 0,45€/kg.

Cabe aclarar que se trata de un impuesto sobre el plástico virgen, ya que para el cálculo de la base imponible no se tendrá en cuenta la cantidad de plástico reciclado incorporado al envase. En la aplicación de dicho impuesto, se desgrava tanto el plástico reciclado procedente del reciclado mecánico como del químico[15]. Este impuesto se está viendo de forma similar, aunque con algunas particularidades, en otros países de Europa como el Reino Unido o Italia.

Este punto hace que la implantación de plantas de reciclado químico pueda verse favorecida a corto y medio plazo para cubrir la necesidad de material reciclado por parte de la industria.

De forma adicional, el nuevo Real Decreto de envases y

10 Circular Plastics Alliance – Roadmap to 10 Mt recycled content by 2025 23 September 2021.
11, 15 Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular.
12 Directiva (UE) 2019/904 del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de junio de 2019 relativa a la reducción del impacto de determinados productos de plástico en el medioambiente.
13 Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre residuos.

El marco legislativo actual y futuro sienta las bases para el desarrollo de nuevas tecnologías de reciclado complementarias que permitirán dar respuesta a las necesidades del mercado

residuos de envases a nivel nacional, que fue sometido a información pública el pasado mes de octubre de 2021 (en la actualidad en fase de tramitación[15]) establece objetivos concretos, tanto de reducción en peso de envases generados, como del número de botellas para bebidas de plástico de un solo uso que se comercializan, para conseguir que todos los envases puestos en el mercado en 2030 sean 100% reciclables y siempre que sea posible, reutilizables.

Se incluirán además unos criterios de ecomodulación, que contemplan entre, otros aspectos, la reciclabilidad y el contenido en reciclado de los productos. Fijará además la obligación de que los envases fabricados con plástico contengan al menos un porcentaje de plástico reciclado establecido para cada tipología de envase y para cada horizonte temporal. En este Real Decreto se incluirá la obligación de verificar mediante certificación los aspectos exigidos, como por ejemplo dicho contenido en material reciclado.

El contenido obligatorio de plástico reciclado en envases también será uno de los aspectos clave en la futura Directiva Europea de Envases y Residuos de Envases[16] que en la actualidad se encuentra en fase de revisión. Adicionalmente la Comisión Europea publicó en diciembre de 2021 una nueva comunicación[17] en la que se plantea que al menos el 20% del carbono utilizado en los productos químicos y plásticos debe provenir de fuentes sostenibles no fósiles para 2030.

Pero los cambios legislativos en materia de circularidad y reciclado van más allá del sector de los envases y afectan a sectores muy diversos, como por ejemplo el sector del automóvil[18] o el sector de la edificación y construcción[19]. En definitiva, el marco legislativo actual y futuro marca una clara tendencia hacia un mayor uso de materiales reciclados cada vez en más aplicaciones, dando cabida al desarrollo de nuevas tecnologías de reciclado complementarias para dar respuesta a las necesidades del mercado en un futuro no tan lejano.

15 https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/participacion-publica/210927proyectorddeenvases_tcm30-531124.pdf
16 Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases
17 COM(2021)/800 Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo y al Consejo Ciclos de Carbono Sostenible.
18 Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se modifica la Directiva 2000/53/CE relativa a los vehículos al final de su vida útil, por lo que se refiere a las competencias de ejecución atribuidas a la Comisión
19 Reglamento (UE) nº 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 2011 , por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción y se deroga la Directiva 89/106/CEE del Consejo Texto pertinente a efectos del EEE

3 Reciclado químico: descripción general y tecnologías asociadas

3.1 Jerarquía de residuos y reciclado químico

La directiva marco de residuos[21] y su posterior modificación[22] define el reciclado como *"toda operación de valorización mediante la cual los materiales de residuos son transformados de nuevo en productos, materiales o sustancias, tanto si es con la finalidad original como con cualquier otra finalidad. Incluye la transformación del material orgánico, pero no la valorización energética ni la transformación en materiales que se vayan a usar como combustibles o para operaciones de relleno".*

En el tratamiento de residuos plásticos, existen diferentes tecnologías y procesos de reciclado que convierten estos residuos en recursos. Entre ellos, el reciclado mecánico el más extendido y arraigado, y el que actualmente proporciona la gran mayoría de plásticos reciclados que hay en el mercado.

Tipos de reciclado | FIG. 9

Fuente: Cefic

20. Cefic: Chemical Recycling: Making Plastics Circular
21 Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas directivas.
22 Directiva 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos.

Reciclado **MECÁNICO**

El **reciclado mecánico** es un proceso de valorización que, mediante temperatura y cizalla, convierte un residuo plástico en un material reciclado que puede ser empleado para la misma aplicación o para otra distinta. En este proceso la cadena polimérica se mantiene, es decir, no se produce una rotura de cadena, salvo la debida a la posible degradación del propio polímero.

El reciclado mecánico es aplicable a los materiales plásticos, aunque en el caso de los materiales termoestables éste se limite en la mayoría de los casos a un reciclado donde el resultado se incorpora como carga y no como polímero (ya que el polímero no puede volver a fundirse).

Reciclado por **DISOLUCIÓN**

El **reciclado por disolución** (también conocido como reciclado físico) es una operación de valorización por la que los residuos plásticos se someten a la acción de disolventes y otros agentes químicos por los que los diferentes polímeros son disueltos y separados así de la totalidad del residuo. Esta operación tiene como finalidad separar polímeros, o incluso aditivos para, sin provocar la ruptura de la cadena polimérica, obtener materiales separados que luego puedan ser incorporados como materias primas recicladas. Al no producirse rotura de la cadena, no se considera un reciclado químico, aunque en algunos documentos se incluye dentro de esta categoría.

Reciclado **QUÍMICO**

El **reciclado químico o reciclado molecular** según la norma ISO 15270:2008[23] es la "conversión a monómero o la producción de nuevas materias primas cambiando la estructura química de los residuos plásticos mediante craqueo, gasificación o despolimerización, excluida la recuperación de energía y la incineración".

Según esta definición y según la jerarquía de residuos, el reciclado químico debería incluirse dentro del apartado de reciclado, por encima de la valorización energética y la eliminación en vertedero.

El reciclado por disolución y el reciclado químico son actualmente más incipientes y se espera un gran desarrollo en los próximos años.

Esquema de polimerización y despolimerización (un tipo de reciclado químico) | FIG 10

23 ISO 15270:2008 "Plastics Guidelines for the Recovery and Recycling of Plastics Waste"

3.2 Tipos de reciclado químico

El reciclado químico es un tipo de operación de valorización donde la cadena polimérica se rompe mediante la acción de diferentes agentes (térmicos, químicos o biológicos) para producir sustancias de menor tamaño que tienen interés para la industria química y/o la de polímeros.

Según el agente que produzca la rotura se pueden distinguir diferentes tipos de reciclado químico:

Tipos de reciclado químico | FIG 11

Craqueo térmico (Termólisis). La rotura de la cadena polimérica se produce gracias a la acción de la temperatura y en algunos casos mediante el uso de catalizadores. Los principales procesos o técnicas son la **pirólisis** (en ausencia de oxígeno) y la **gasificación** (con oxígeno). Generalmente, la termólisis tiene lugar en condiciones más estrictas que en una combustión total. Es aplicable a residuos compuestos tanto por polímeros de adición como de condensación.

Las nuevas materias primas obtenidas por pirólisis y gasificación, aceite de pirólisis y gas de síntesis respectivamente, se introducen de nuevo en el ciclo productivo sustituyendo a la materia prima tradicional para obtener nuevos productos, como por ejemplo nuevas poliolefinas o metanol.

Esquema de un proceso de craqueo térmico (termólisis) | FIG 12

Ambos procesos están dirigidos a reciclar residuos plásticos mixtos. En el caso de la pirólisis se buscan flujos más ricos en PE, PP y PS, ya que la mayor proporción de enlaces Carbono-Carbono en estos polímeros, mejora el rendimiento del proceso.

Craqueo químico (Quimiólisis): Normalmente se denomina solvólisis o despolimerización. La rotura de la cadena polimérica se produce gracias a la acción de un reactivo, que puede ser un disolvente, juntamente con la aplicación de temperatura y en algunos casos presión y catalizadores, obteniéndose monómeros u oligómeros. Es aplicable a residuos compuestos por polímeros de condensación.

Generalmente, el proceso de solvólisis es más selectivo, por lo que se suele aplicar a residuos monomateriales como PET, PA, PU, polimetilmetacrilato (PMMA) o ácido poliláctico (PLA).

Ejemplo de reacción de Ejemplo de reacción de craqueo químico | FIG 13

Imagen de PET-asa

El craqueo biológico tiene un futuro muy prometedor. Potencialmente podría aplicarse a cualquier tipo de residuo plástico

Ejemplo de reacción de craqueo biológico | FIG 14

Craqueo biológico: La rotura de la cadena se produce mediante el uso de enzimas como biocatalizadores, degradando los polímeros tanto de adición como de condensación en monómeros u oligómeros. Las enzimas son muy selectivas, por lo que se debe seleccionar de forma apropiada.

Actualmente, el craqueo biológico se limita al reciclado de PET y fibras de poliéster[24], aunque potencialmente es un método que puede aplicarse a cualquier residuo plástico.

En todos los casos anteriores se trata de procesos que producen la rotura o craqueo de la cadena polimérica.

En la tabla 2 se muestran los procesos de reciclado químico normales según el polímero. Nótese que en el caso de craqueo químico, los polímeros tienen que ser de condensación. En el caso del craqueo térmico, aunque se podrían trabajar sobre todos los tipos de polímeros, los rendimientos son mucho más bajos si hay heteroátomos, diferentes al C o al H. En el caso de los materiales reforzados como poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) o con fibra de carbono (PRFC) tanto el craqueo químico como el craqueo térmico permiten la recuperación de la fibra, material de gran interés para la industria.

La mayoría de los residuos plásticos podrían reciclarse químicamente. El reciclado químico se centra en flujos de residuos que actualmente no tienen una buena salida mediante reciclado mecánico y que, por tanto, su fin de vida actual es la eliminación en vertederos o la incineración.

Procesos de reciclado químico por tipo de polímero | TABLA 2

	PE	PP	PET	PS	PA	PC	PVC	PU	PRFV	PRFC	Mixtos
Craqueo térmico											
Craqueo químico											
Craqueo biológico (*)											

**Se indica PET, aunque podría aplicarse en un futuro a cualquier residuo plástico*

24 https://www.carbios.com/fr/

Las corrientes residuales idóneas para el reciclado químico son:

- Residuos con componentes íntimamente mezclados y que contienen diferentes polímeros termoplásticos difíciles de clasificar (por ejemplo, algunos tipos de envases de varias capas, automoción o residuos de trituradoras de aparatos eléctricos y electrónicos)
- Residuos con alto nivel de impurezas, como aquellos residuos plásticos que se han extraído del mar, incluidos artes de pesca, residuos con adhesivos o grasas, envases industriales contaminados, etc.
- Residuos de tamaño pequeño que se escapan de las plantas de clasificación de residuos
- Residuos provenientes de procesos de reciclaje mecánico
- Plásticos termoestables como colchones de poliuretano, plásticos usados para aislamientos en frigorífico, etc.
- Productos al final de su vida útil que contienen plásticos que han sido reciclados mecánicamente varias veces con un agotamiento progresivo de sus propiedades
- Residuos que contienen sustancias restringidas que necesitan ser extraídas de los plásticos reciclados

Cada uno de los procesos de reciclado permite obtener sustancias o productos que pueden volver a introducirse a la cadena de valor del plástico. En función del punto de la cadena de valor en el que se reincorpore serán necesarios más o menos procesos hasta llegar al producto final, lo cual supondrá un impacto ambiental, incluida su huella de carbono, diferente.

Por todo ello, es importante considerar un análisis de ciclo de vida completo de proceso a la hora de evaluar el impacto en términos de gases de efecto invernadero (GEI) de esta tecnología. El reciclado químico puede evitar la incineración de plásticos y facilitar su reutilización como materia prima lo que contribuiría a evitar la exploración de refino, reduciendo así las emisiones de GEI asociadas a estos procesos y favoreciendo un balance de emisiones positivo.

Existen numerosos estudios científicos que muestran los beneficios en términos de emisiones de combinar el reciclado mecánico y el reciclado químico[25-27]

Cadena de valor y tipos de reciclado | FIG 15

25 Rebekka Volk, Christoph Stallkamp, Justus J. Steins, Savina Padumane Yogish, Richard C. Müller, Dieter Stapf, Frank Schultmann. Techno-economic assessment and comparison of different plastic recycling pathways. A German case study. Journal of Industrial Ecology 2021;1–20.
26 Chemical Recycling: Greenhouse gas emission reduction potential of an emerging waste management route. QUANTIS &CEFIC. October 2020.
27 Chemical Recycling of Polymeric Materials from Waste in the Circular Economy, Final Report. European Chemicals Agency & RPA Europe. August 2021.

Todos los procesos de reciclado se consideran necesarios y complementarios, ya que cada uno se puede aplicar en distintas soluciones y aplicaciones

3.3 Otros procesos de valorización y su complementariedad

Tal como se ha comentado con anterioridad, existen diferentes procesos de reciclado: mecánico, por disolución y químico. Todos ellos están en una escala por encima de la valorización energética en la jerarquía de residuos.

La valorización o recuperación energética es el empleo de residuos como fuente de energía mediante su conversión en electricidad y/o calor. Esta valorización se puede producir en algunas instalaciones industriales como cementeras o fábricas de pasta de papel, que requieren una gran cantidad de energía y en la propia instalación se sustituye un combustible tradicional como gas o carbón por un residuo.

Hay que tener en cuenta que los procesos térmicos, como la pirólisis o la gasificación, pueden producir tanto nuevas materias primas como combustibles. En el primer caso se trataría de un reciclado químico y en el segundo una valorización energética.

La capacidad mundial de valorización energética de residuos creció de forma significativa en el año 2021, alcanzando valores máximos históricos[28], con una capacidad de tratamiento técnico de alrededor de 41 millones de toneladas al año de residuos sólidos.

Todos los procesos de reciclado se consideran necesarios y complementarios, ya que cada uno se puede aplicar en distintas soluciones y aplicaciones. Y en el caso de que no se pueda tratar un residuo mediante reciclado, la valorización energética es una solución que evita que los residuos sean depositados en el vertedero, obteniéndose un recurso de tipo energético.

El reciclado químico ofrece soluciones que complementan el reciclado mecánico:

- Permite obtener unas mejores propiedades mecánicas y organolépticas tanto del producto final como durante la fase de producción.
- Evita defectos visuales en productos finales y sus funcionalidades
- Facilita la reproducibilidad de un lote a otro de manera sencilla
- Ayuda a fortalecer continuamente los crecientes requisitos de calidad demandados por el mercado e impulsados por los cambios legislativos.

Así, el reciclado químico plantea unas ventajas relacionadas con la vuelta al origen, el concepto de ciclo infinito y la no restricción de material. El proceso descompone las cadenas poliméricas de las que se obtienen hidrocarburos susceptibles de incorporase en procesos petroquímicos para la obtención de monómeros (tipo etileno, propileno, etc.,) que posteriormente se utilizan en la química derivada mediante reacciones de síntesis o polimerización. Es decir, se pueden obtener materiales idénticos a los vírgenes partiendo de residuos plásticos en vez de recursos fósiles convencionales.

El reciclado químico, al igual que el reciclado mecánico, requiere de una serie de pretratamientos, como pueden ser la reducción del tamaño del residuo, separación de flujos o contaminantes o densado de los materiales, entre otros. Estos procesos serán más o menos intensivos dependiendo del residuo de partida y del proceso de reciclado químico empleado.

28 La capacidad mundial de valorización energética de residuos crece más que nunca en 2021. RETEMA nº 235, Noviembre - Diciembre 2021.

El reciclado químico contribuye a:

- Aumentar la eficiencia de recursos.
- Cerrar de ciclo en la transición a una economía circular para los plásticos, aprovechando estos recursos que de otra manera acabarían en vertedero o incinerados.
- Disminuir la huella de carbono de las soluciones actuales del fin de vida de algunos residuos plásticos que van a vertedero o se incinieran cuando se considera el ciclo de vida del artículo de plástico completo.
- Reducir el uso de recursos fósiles sustituyendo el material virgen por material reciclado químicamente.
- Contribuir a la independencia de los recursos de terceros países.
- Reducir las emisiones de CO_2.

Así, todas las tecnologías de reciclado son necesarias y complementarias para cumplir los objetivos de la UE en materia de reciclado. Se requiere, por tanto, una visión holística en la gestión de los residuos plásticos, con procesos en cascada que permitan dar una solución global y eficiente a los residuos produciendo materias primas plásticas y químicas para la industria con el valor y calidad adecuada a todos los productos y aplicaciones, en línea con el Pacto Verde Europeo[29].

Todas las tecnologías de reciclado son necesarias y complementarias para cumplir los objetivos de la UE en materia de reciclado

29 COM/2019/640 final. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal.

El reciclado químico y el mecánico convivirán, dando solución a fracciones diferentes de residuos plásticos y el mercado encontrará el equilibrio entre ambos

3.4 Retos del reciclado químico

Es necesario potenciar el reciclado químico tanto en España como en Europa. Para que el reciclado químico sea una realidad es necesario trabajar sobre unos aspectos de tipo técnico que pueden limitar su implementación y, que en muchas ocasiones, se definen en comparación con el propio reciclado mecánico.

Así, si se compara el reciclado químico respecto al reciclado mecánico, se debe tener en cuenta que:

- En general las tecnologías asociadas al reciclado químico son incipientes. En los próximos años, se espera una mayor escalabilidad de esta tecnología que nos permita tener más datos sobre la viabilidad técnico-económica real.
- Los procesos de reciclado químico tienen modelos económicos distintos al reciclado mecánico por dos motivos:
  - Los rendimientos de un proceso de reciclado químico son típicamente inferiores a los del reciclado mecánico, obteniéndose menos cantidad de producto reciclado vía química frente a la vía mecánica.
  - Los productos reciclados obtenidos vía reciclado químico son equivalentes a los obtenidos a partir de materias primas vírgenes, pudiendo utilizarse en cualquier aplicación incluso en aquellas que exigen los máximos estándares de calidad y protección al consumidor, como por ejemplo el uso alimentario.
- El impacto ambiental del reciclado químico es mayor que el del reciclado mecánico debido a dos causas principales. Por un lado, la diferencia de rendimientos entre ambos procesos. El reciclado químico tiene típicamente unos factores de conversión de residuo plástico a aceite de pirólisis o a monómero más bajos que los que se obtienen a partir de residuos plásticos a reciclados plásticos tratados mecánicamente. Eso significa que todo el impacto ambiental del proceso se atribuye a una menor cantidad de producto final deseado. Por otro lado, el reciclado químico sustituye en la petroquímica a un hidrocarburo o a un monómero que luego hay que polimerizar, lo cual aumenta el número de procesos, si se compara con el reciclado mecánico.
- El ahorro de emisiones en el sistema es menor si se compara con el reciclado mecánico, pero a cambio, se consigue un producto equivalente al polímero virgen totalmente circular, sin limitaciones de uso en el mercado.
- En el reciclado químico se trabaja con procesos químicos. Se debe tener en cuenta la complejidad intrínseca, así como los aspectos relacionados con los riesgos químicos. y los aspectos relacionados con los riesgos químicos. Es clave su integración con la industria química.

Así, el reciclado de residuos plásticos ya sea químico o mecánico, contribuye a la economía circular. Las características del flujo de residuo plástico y la aplicación de destino determinará la alternativa de tratamiento más adecuada. Es por ello por lo que se trata de tecnologías complementarias y no sustitutivas.

El reciclado químico será una opción muy favorable para producir materiales de alta calidad, en flujos muy concretos:

- Residuos que contengan una mezcla de diferentes plásticos
- Residuos contaminados
- Residuos termoestables
- Cuando se requiera unas características o aplicaciones muy concretas

4 Contabilidad y Trazabilidad del Plástico Reciclado Químicamente: Balance de Masas

4.1 Definición y aplicaciones

La industria de los plásticos y del reciclado requieren trazabilidad de sus materiales, productos y procesos ya que gracias a la misma se puede conocer y garantizar cuestiones tales como su origen o la cantidad de plástico reciclado que tenemos en un producto.

Según la RAE (Real Academia Española de la Lengua) trazabilidad es la "Posibilidad de identificar el origen y las diferentes etapas de un proceso de producción y distribución de bienes de consumo".

La norma UNE-EN 15343: 2008[30] especifica los procedimientos necesarios para la trazabilidad de los plásticos reciclados mecánicamente, usándose dicha trazabilidad como base para el cálculo del contenido de reciclado:

$$\text{\% del contenido de reciclado del producto} = \frac{\text{masa de los materiales reciclados en el producto}}{\text{masa total del producto}} \times 100$$

Para este porcentaje se tienen en cuenta los materiales de preconsumo y posconsumo empleados. El material recuperado en el mismo proceso de fabricación (rebabas, recortes...), no se considera a la hora de contabilizar el contenido de reciclado.

En la norma UNE-EN ISO 14021: 2017[31] se definen los siguientes conceptos:

Material de preconsumo. Material desviado de la corriente de residuos durante un proceso de manufactura. Queda excluida la reutilización de materiales de reelaboración, desbastes o retales, generados en un proceso y que tienen la capacidad de ser recuperados [retornados] al mismo proceso que los ha generado.

Material de posconsumo. Material generado por los hogares o por los comercios, equipamientos industriales e institucionales en su papel como usuarios finales del producto que no puede ser utilizado por más tiempo para su propósito previsto. Esto incluye las devoluciones de material de la cadena de distribución o la instalación de productos plásticos (por ejemplo, recortes de aislamiento, de suelos, o revestimientos de paredes).

Material reciclado. Material que ha sido reprocesado a partir de material recuperado [retornado] por medio de un proceso de manufactura y convertido en un producto final o como componente para incorporarlo a un producto.

Material recuperado [retornado]. Material que de otra forma hubiera sido dispuesto como residuo o utilizado para recuperar energía, pero en cambio, ha sido recogido y recuperado (retornado) como material de entrada, en lugar de materia prima nueva, para un proceso de reciclaje o fabricación.

30 UNE-EN 15343: 2008 "Plásticos. Plásticos reciclados. Trazabilidad y evaluación de conformidad del reciclado de plásticos y contenido en reciclado"
31 UNE-EN ISO 14021: 2017 "Etiquetas ecológicas y declaraciones medioambientales. Autodeclaraciones medioambientales (Etiquetado ecológico Tipo II)".

El balance de masas, establece un conjunto de reglas para garantizar la atribución de materia prima reciclada en nuevos productos

Hacer el cálculo del contenido de reciclado en un producto es sencillo en el caso de un reciclado mecánico; sin embargo, no es aplicable al reciclado químico puesto que en el mismo se produce una rotura de cadena y luego una reconstrucción de la misma para obtener un polímero reciclado. Es necesario, pues, aplicar una metodología, que, cubriendo la misma veracidad y control de la trazabilidad de la norma asegure, entre otros aspectos, los siguientes conceptos:

- El porcentaje de reciclado que lleva un producto.
- El origen del residuo (preconsumo o posconsumo).
- La proporción que representa la valorización energética (residuo usado como energía) y la proporción que representa el reciclado químico (residuo usado como material), en el caso de tratamiento térmico.

Esta metodología, conocida como **balance de masas**, establece un conjunto de reglas para garantizar la atribución de materia prima reciclada en nuevos productos permitiendo rastrear la ruta de los residuos/materia prima en cada caso y establecer una trazabilidad realista y transparente desde la entrada de la materia prima (residuo) hasta la salida del producto (materia circular) y a lo largo de toda la cadena de valor. La norma ISO 22095[32] establece las bases y conceptos relacionados con el balance de masas y la cadena de custodia.

El balance de masas es aplicable a cualquier proceso de reciclado químico, independientemente del producto resultante. El modelo de balance de masas permite la mezcla física de materiales e intermedios provenientes de residuos y materias primas vírgenes y también las reacciones químicas de los materiales y sustancias.

32 ISO 22095:2020 Chain of custody — General terminology and models.
33 Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. Boletín Oficial del Estado nº 85, de 9 de abril de 2022.

Esta metodología es certificable por una tercera parte independiente en cada una de las etapas de la propia cadena de valor, lo que permite asegurar la condición de material reciclado y la diferenciación de los procesos de reciclado químico de los de valorización energética. Además, puede servir para la obtención de algunas ventajas fiscales o impositivas como por ejemplo la reducción del impuesto de envases plásticos no reutilizables en España, relacionados con ley 7/2022 de residuos y suelos contaminados para una economía circular[33].

Las empresas o entidades que lo apliquen deben calcular el porcentaje promedio de las entradas y salidas de un proceso o conjunto de procesos (por ejemplo, una línea de gasificación), definiendo en cada caso el periodo en el cual se hace ese porcentaje promedio. Cuanto más corto sea el periodo más realista es el dato, principalmente si el proceso fluctúa mucho. Por esta razón el periodo ideal sería lote a lote, aunque en la mayoría de los casos puede no ser viable.

En cada caso, se tendrá información sobre: el tipo (residuos, materia prima virgen y reciclada), las cantidades y el origen de cada insumo, siendo necesario especificarlo cuando los insumos son de diferente origen.

Toda esta información se debe documentar a través de toda la cadena de suministro. Además, se tiene que verificar que la cantidad de productos de salida circulares no sea superior a la cantidad de residuos de entrada, considerándose en cada caso los rendimientos de cada una de las etapas de proceso.

Los rendimientos o factores de conversión de cada uno de los procesos pueden variar a lo largo del tiempo debido a aspectos técnicos, pero también a cuestiones de mercado. Por esta razón, cada lote o cada periodo de tiempo considerado debe presentar un rendimiento o factor de conversión diferente al obtenido en el anterior o en el posterior.

La empresa debe medir el rendimiento de cada proceso que se emplee para obtener los productos reciclados (reciclado químico) o su utilización directa como combustibles/energía (valorización energética), según el caso. Estos rendimientos se deben documentar por lote o periodo y deben poder ser verificados.

El modelo de balance de masas permite la mezcla física de materiales e intermedios provenientes de residuos y materias primas vírgenes y también las reacciones químicas de los materiales y sustancias

Actualmente existen certificaciones voluntarias relacionadas con el balance de masas aplicables a reciclado químico. En el Anexo I del presente informe se muestra un breve resumen de dichas certificaciones.

A continuación, se muestran dos ejemplos de aplicación del balance de masas en dos procesos típicos de reciclado químico: pirólisis de residuos mixtos y solvólisis de PET.

4.2 Balance de masas aplicado a un proceso de pirólisis

El balance de masas debe aplicarse a toda la cadena de valor y no solamente a un proceso del sistema, puesto que algunos productos de determinados procesos como la pirólisis, generan otros productos como para su utilización directa combustibles que no se deben considerar como reciclaje, sino como valorización energética. Tal y como se muestra en la siguiente figura.

En la figura se puede apreciar cómo los residuos plásticos mixtos alimentan una planta de pirólisis con dos productos principales de salida: un producto gas, que se quema y se utiliza como energía para el propio proceso de pirólisis y un aceite pirolítico (líquido) que se puede limpiar y refinar para diferentes usos.

Este aceite pirolítico debe ser procesado nuevamente en instalaciones de hidrotratamiento y/o craqueo con el objetivo de obtener monómeros para nuevos materiales circulares, produciéndose al mismo tiempo, por la naturaleza de los procesos, una fracción que acaba en combustibles.

Si el balance de masas se aplicará únicamente al proceso de pirólisis (caso A de la Figura 16), la producción de combustibles en muchos casos no se conocería y por tanto se asignaría una mayor cantidad a reciclaje. Sin embargo, al incluir el proceso posterior de refino (caso B de la Figura 16) esta división se identifica, y se aproxima más a la cantidad real.

El balance de masas, establece un conjunto de reglas para garantizar la atribución de materia prima reciclada en nuevos productos

El balance de masas aplicado al proceso global desde el residuo plástico hasta el producto reciclado permite trazar de forma transparente la asignación de reciclado correspondiente.

Se recomienda, por tanto, aplicar el procedimiento a toda la cadena de valor.

Balance de Masas aplicado a pirólisis | FIG. 16

4.3 Balance de masas aplicado a un proceso de solvólisis

El balance de masas también se puede aplicar a un proceso de craqueo químico o solvólisis. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de residuos de PET de diferentes procedencias que alimenta un reactor de glicólisis (uno de los diferentes tipos de procesos de solvólisis; en este caso el agente químico es un glicol). Este reactor se alimenta de otros reactivos como etilenglicol. El producto de salida sigue a un reactor de polimerización dando lugar al producto reciclado, a etilenglicol y otros productos.

Aquí no hay recuperación de energía ya que solamente se obtienen productos de PET reciclado. Es importante resaltar que el etilenglicol es un insumo del proceso, pero no se considera en el balance de masas ya que no se transforma en un producto reciclado. Lo mismo ocurre con otros productos que contribuyen al proceso como catalizadores, agua y/o gas natural, no deben ser considerados en el balance de masas ya que no se transforman en productos finales.

Este proceso de solvólisis es más sencillo que el de pirólisis, puesto que las sustancias obtenidas se emplean directamente en la producción de materiales reciclados y no se necesita una diferenciación con otros procesos como la valorización energética. Sin embargo, se recomienda aplicar el procedimiento a toda la cadena de valor para mostrar la trazabilidad a través de la misma.

Balance de Masas aplicado a solvólisis | FIG. 17

5 Estado del arte en España

5.1 Empresas de reciclado químico

Aunque el reciclado químico es una buena oportunidad para recuperar residuos plásticos como recursos, la realidad es que en la actualidad su implantación es muy baja. El número de plantas de reciclado químico en España y en Europa, es muy limitado tanto por el número como por la capacidad de producción.

En esta figura se observa el bajo porcentaje de reciclado químico, en comparación con el reciclado mecánico. El primero está presente únicamente en dos de los países analizados: Alemania e Italia. Se estima que, en la actualidad en Europa solamente el 0,2% de los residuos plásticos posconsumo recogidos son valorizados mediante procesos de reciclado químico.

Esta situación europea es replicable actualmente a España, ya que, a día de hoy, existen todavía pocas plantas industriales que reciclen químicamente residuos plásticos.

Índice de reciclaje de envases plásticos por países en 2018 | FIG. 18

Fuente: Plastics Europe

En la tabla 3 se muestran algunas plantas que actualmente desarrollan procesos de reciclado químico en España.

Ejemplos de plantas de reciclado químico que operan en España | TABLA 3

Empresa	Proceso	Capacidad (toneladas residuos/año)
PLASTIC ENERGY[34] (Sevilla)	Pirólisis	5.500 (*)
PLASTIC ENERGY (Almería)	Pirólisis	5.500 (*)
RECICLALIA[35]	Pirólisis	500
TOTAL		**> 11.500****

Nota (*): toneladas aceite pirolítico producido/año
Nota (**): se indica una capacidad mayor ya que algunos datos hacen referencia a la producción de aceite pirolítico y no a las toneladas reales de residuos tratados

En la actualidad, con la capacidad disponible de reciclado químico en España, se tratan más de 11.500 toneladas de residuos plásticos.

Hay que indicar que existen otras plantas como la de SULAYR[36] que tienen una capacidad de tratamiento de 38.000 toneladas/año de un proceso de valor añadido como es el de reciclado por disolución.

Partiendo de este número actual de plantas, el crecimiento esperado es importante, tanto por el volumen de proyectos y plantas de laboratorio y piloto que ya existen en el país, como por la implantación que se prevé a corto plazo en el territorio.

Algunas de las empresas señaladas anteriormente están empezando su andadura y son una spin-off de alguna universidad española o del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Esto muestra la capacidad que tiene España en la innovación y desarrollo de esta tecnología.

Empresas emergentes con tecnología de reciclado químico en España | TABLA 4

Empresa	Proceso
B-CIRCULAR[37]	Pirólisis
POLYKEY POLYMERS SL[38]	Solvólisis
GSF UPCYCLING[39]	Craqueo térmico
YASED LAB[40]	Reciclado por disolución
FYCH TECHNOLOGIES[41]	Reciclado por disolución
EVOENZYME[42]	Craqueo biológico

34 https://plasticenergy.com/
35 https://reciclaliacomposite.com/
36 https://sulayrgs.com/
37 https://www.bcircular.com/
38 https://polykey.eu/
39 https://gsfupcycling.com/
40 htpps://yasedlab.com
41 https://www.fychtech.com/
42 https://evoenzyme.com/

Con respecto a las nuevas plantas industriales de reciclado químico, cabe destacar:

- **REPSOL**[43] está construyendo una planta de solvólisis de poliuretano en Puertollano que estará operativa a finales de 2022 con una capacidad de tratamiento de 2.000 toneladas de residuos/año.
- **SACYR** junto con Honeywell tienen previsto la instalación de una planta de pirólisis en Andalucía que estará operativa a principios de 2023 con una capacidad de tratamiento de 30.000 toneladas de residuos/año.
- **Plastic Energy**[44] anuncia junto con TotalEnergies una segunda planta de reciclaje de plásticos por pirólisis en Sevilla que estará operativa en el año 2025 con una capacidad de tratamiento de 33.000 toneladas de residuos/año. El material reciclado obtenido se dedicará al envasado alimentario.
- **Plastic Energy**[45] ha anunciado la construcción de una planta de tratamiento de residuos de film plástico en Santa Cruz de Tenerife.
- **REPSOL**[46] se ha unido a Enerkem y Agbar para construir una planta de gasificación de residuos en Tarragona que estará operativa a finales de 2025, con una capacidad de tratamiento de 400.000 toneladas de RSU no reciclables/año para obtener 220.000 toneladas de metanol/año para transformar en materiales circulares o biocombustibles avanzados.

Nuevas plantas de reciclado químico previstas en España | TABLA 5

Empresa	Proceso	Inicio operación	Capacidad de tratamiento (toneladas residuos/año)
REPSOL	Solvólisis	2022	2.000
SACYR/HONEYWELL	Pirólisis	2023	30.000
PLASTIC ENERGY/TOTALENERGIES	Pirólisis	2025	33.000
REPSOL/ENERKEM/AGBAR	Gasificación	2025	400.000
PLASTIC ENERGY	Pirólisis	2024	N/A
TOTAL			**>465.000**

Además de estas plantas, existen otras ya en funcionamiento o en previsión que actualmente no están asociadas a empresas químicas, pero que venden o podrían vender aceite pirolítico a las mismas, por lo que la capacidad de reciclado químico podría ampliarse. Un ejemplo es el de la empresa PRECO[47] que actualmente presenta 4 plantas en la península ibérica (1 en funcionamiento y 3 en desarrollo). La primera, con una capacidad de producción de 20.000 toneladas de residuos de plástico al año y las que están en desarrollo con un total de producción de 430.000 toneladas de residuos plásticos al año. En la misma línea está la planta construida recientemente por WPR Global S.L.[48] que trata 8 toneladas de residuos plásticos al día para producir en la actualidad biodiésel y gasolina.

Actualmente hay empresas que están haciendo pruebas y desarrollo de solvólisis de residuos, tanto termoestables como termoplásticos, para obtener principalmente diferentes sustancias como Bis(2-hidroxietil)tereftalato (BHET) o derivados y polioles. Este tipo de empresas en ocasiones son pequeños fabricantes de materias primas plásticas, en muchos casos termoestables que a corto plazo pueden estar diversificando su producción hacia el reciclado químico en sus propias instalaciones. La ventaja principal es que trabajan con reactores muy similares a los de polimerización/formulación. Esta situación puede favorecer un aumento de la capacidad de reciclado químico en los próximos años y una diversificación en cuanto a los residuos de partida y los productos reciclados obtenidos.

43 https://www.repsol.com/es/productos-y-servicios/quimica/quimica-news/repsol-construira-puertollano-primera-planta-reciclado-poliuretano-espana/index.cshtml
44 Packaging Insights Newsletter 11 de enero de 2022 "Plastic Energy and TotalEnergies plan second advanced recycling plant in Spain"
45 Plásticos y Caucho. Año XXVI, nº 1.181 - Lunes, 31 de enero de 2022.
46 https://www.repsol.com/es/sala-prensa/notas-prensa/2021/repsol-se-une-a-enerkem-y-agbar-para-construir-una-planta-de-val/index.cshtml
47 https://precocircular.com/proyectos/
48 https://wprglobal.es/

Plantas de Reciclado Químico (existentes y previstas) | FIG.19

Está previsto que la capacidad instalada de tratamiento de residuos por reciclado químico en nuestro país se multiplique por 40 en los próximos 3 años

Grandes multinacionales del sector, como BASF[49], COVESTRO[50] VERSALIS[51], DOW[52-55] o SABIC[56], han expresado su intención o ya están construyendo plantas de características similares a las anteriores a lo largo de Europa. La existencia de un marco normativo favorable, junto con la incorporación del reciclado químico en la recientemente aprobada Ley de Residuos y Suelos Contaminados para una Economía Circular, es un aliciente adicional para para promover la implantación de instalaciones similares en el territorio nacional, que, además, permiten beneficiarse de la proximidad en la generación de residuos.

Esta implementación y crecimiento de las plantas de reciclado químico se está produciendo a nivel mundial. Así, según datos de Rabobank, se espera que en 2025 la cantidad de plantas de reciclado químico se duplique y la capacidad se triplique o incluso se cuadruplique. Las zonas con mayor inversión en estas tecnologías son Europa y Estados Unidos, siendo la primera la que mayor número de plantas concentrará con un 45-50% de las plantas totales a nivel mundial.

49 https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/mass-balance-approach/chemcycling.html
50 https://www.covestro.com/press/closing-the-loop-for-polyurethane-mattresses-trade/
51 https://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2020/02/versalis-to-launch-hoop-tm-chemical-recycling-towards-infinitely-recyclable-plastic.html
52 https://corporate.dow.com/en-us/news/press-releases/dow-and-mura-technology-announce-partnership-to-scale-game-chang.html
53 https://corporate.dow.com/en-us/news/press-releases/dow-expands-global-capabilities-for-circular-plastics--with-init
54 https://corporate.dow.com/en-us/news/press-releases/dow-to-build-market-development-unit-to-enable-manufacturing
55 https://corporate.dow.com/en-us/news/press-releases/dow-invests-in-plastogaz.html?msclkid=2fc576c6c08a11eca6865ce164c710ec
56 https://cartagena.sabic.com/es/news/26266-sabic-y-plastic-energy-preparados-para-comenzar-la-construccion-de-una-pionera-instalacion-de-reciclaje-avanzado-con-el-fin-de-aumentar-la-produccion-de-polimeros-circulares-certificados

El PERTE de Economía Circular puede ser otra palanca para que el sector siga avanzando en la circularidad de los plásticos y en el desarrollo del reciclaje

Este crecimiento va en consonancia con el aumento significativo de las inversiones previstas en materia de reciclado químico a nivel europeo[58], de 2.600 millones de euros en 2025 a 7.200 millones de euros en 2030 con 44 proyectos previstos en 13 países de la UE. Se estima que la producción de plásticos reciclados químicamente aumentará a 1,2Mt en 2025 y a 3,4 Mt en 2030. Partiendo estas cifras y extrapolándolas a España, se puede prever que las inversiones estarán en el entorno de 500-650 millones de euros en el año 2030.

El Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica en Economía Circular[59] (PERTE EC), puede ser otra palanca para que el sector siga avanzando en la circularidad de los plásticos y en el desarrollo del reciclaje. Este proyecto estratégico canaliza ayudas por valor de 492 millones de euros que se desarrollarán en España desde 2022 hasta 2026 en dos líneas de actuación. La primera con un total de 192 millones de euros, abarca acciones transversales para impulsar la economía circular en la empresa con el objetivo de mejorar la competitividad y la innovación en el tejido industrial en cuatro categorías: reducción del consumo de materias primas vírgenes, ecodiseño, gestión de residuos y digitalización.

La segunda línea de actuación, con un presupuesto de 300 millones de euros, se centra en actuaciones en tres sectores clave: textil, **plástico** y energías renovables. Los tres incluyen acciones para potenciar la reutilización y el reciclado; nombrándose en el sector del plástico explícitamente el reciclado químico. Estas ayudas deben fomentar la circularidad del sector. Hay que destacar que se estima que la economía circular tiene potencial para crear unos 700.000 puestos de trabajo en Europa, de los que al menos un 10% podría generarse en España.

Perspectiva de crecimiento en el número de plantas de reciclado avanzado hasta 2025 | FIG. 20

Fuente: RABOBANK[57]

57 Packaging Insights Newsletter 4 de mayo de 2021 "Rabobank strategist: Advanced recycling is proliferating but not the circular economy silver bullet".
58 Plastics Europe. Chemical Recycling in Brief 26 May 2021.
59 https://planderecuperacion.gob.es/https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/perteenec_baja_tcm30-537854.pdf

5.2 Proyectos de I+D+i de reciclado químico

A pesar de tratarse de una tecnología incipiente a nivel industrial, son muchas las iniciativas de I+D+i que los distintos agentes del ecosistema están desarrollando. En el Anexo II se muestran algunos ejemplos de proyectos europeos sobre reciclado químico[60] con participación de socios españoles. Igualmente, se recogen en este Anexo proyectos con financiación nacional.

El gran número de proyectos no solo muestra el interés de la industria y resto de agentes de tecnología y conocimiento, sino también el de la propia Administración Pública que apuesta por la necesidad de encontrar soluciones a los residuos plásticos y a su integración en la cadena productiva a través de convocatorias como Misiones Ciencia e Innovación[61] del CDTI o Líneas Estratégicas[62] de la Agencia Estatal de Investigación. En 2021, a través de estas convocatorias, el Ministerio de Ciencia e Innovación, ha apoyado proyectos por valor de más de 4 M€ relacionados con la economía circular y la sostenibilidad de los plásticos Estos proyectos fomentan la colaboración público-privada y que facilitan el desarrollo e implementación de tecnologías de reciclado químico y el desarrollo de plantas piloto como base del desarrollo industrial a nivel nacional, permitiendo que España se posicione como referente en esta tecnología.

Es de esperar que todos estos proyectos, con distintos niveles de madurez tecnológica, en el corto y medio plazo, se conviertan en una realidad en el mercado.

El interés por estas tecnologías, como vía para abordar el reto de los residuos plásticos, también se está produciendo en otros países de nuestro entorno. Cabe señalar que, aunque también hay proyectos europeos en estas temáticas donde no participan organizaciones españolas, el número es relativamente menor. Esto demuestra la especialización y la implicación de las entidades españolas en esta temática.

60 La relación de proyectos incluye craqueo térmico, solvólisis, craqueo biológico y reciclado por disolución
61 https://www.cdti.es/index.asp?MP=100&MS=902&MN=2&TR=C&IDR=3016
62 https://www.aei.gob.es/convocatorias/buscador-convocatorias/proyectos-idi-lineas-estrategicas-colaboracion-publico-privada

Muchos de los proyectos en ejecución se están desarrollando a través de una colaboración público-privada

A continuación, se detallan algunos ejemplos de proyectos a nivel europeo que son de sumo interés bien por la temática concreta de algunos de ellos o porque son el punto de partida de algunas plantas piloto o industriales presentes y futuras:

- RESYNTEX[63]: A new circular economy concept: from textile waste towards chemical and textile industries feedstock.
- CHEMPET[64]: Industrial scale PET chemical recycling via an innovative glycolysis process.
- Industrial[65] scale PET chemical recycling plant based on innovative glycolysis process
- CRNPE[66]: Chemical Recycling for the New Plastic Economy.
- CATALEPTIC[67]: A developed thermochemical approach for catalytic depolymerization of plastics. 101033386.
- OPTIMA[68]: Process intensification and innovation in olefin Production by Multiscale Analysis and design.
- MMATWO[69]: Second generation Methyl MethAcrylate.

Muchos de los proyectos en ejecución se están desarrollando a través de una colaboración público-privada. En el Anexo III se recoge una relación de Universidades, Centros Tecnológicos y Organismos Públicos de Investigación repartidos por todo el territorio nacional que se dedican a la investigación de reciclado químico de plásticos siendo referentes internacionales en la materia.

Adicionalmente, existen otras iniciativas de inversión privada, que van encaminados a la mejora de procesos, como el proyecto PYROPLAST en el que Repsol, Axens y el IFPEN han desarrollado el proceso Rewind Mix, que permite purificar los aceites de pirólisis eliminando impurezas como cloro, silicio, diolefinas y otros metales). Este novedoso proceso permite su utilización directa como materia prima sin necesidad de dilución en las unidades petroquímicas existentes.

63 https://cordis.europa.eu/project/id/641942
64 https://cordis.europa.eu/project/id/871386
65 https://cordis.europa.eu/project/id/773863
66 https://cordis.europa.eu/project/id/739775
67 https://cordis.europa.eu/project/id/101033386
68 https://cordis.europa.eu/project/id/818607
69 https://cordis.europa.eu/project/id/820687
70 https://www.repsol.com/content/dam/repsol-corporate/es/productos-y-servicios/productos/qu%C3%ADmica/qn23062021-desarrollamos-axens-ifpen-nuevo-proceso-producion-materiales-circulares.pdf

5.3 Patentes de reciclado químico

Un reciente estudio sobre patentes en economía circular del sector del plástico[71] revela que Estados Unidos y Europa destacan como innovadores globales en el reciclado de plástico.

En la tabla 6 se indica el índice de ventaja tecnológica revelada. Este índice establece la especialización real en la tecnología estudiada. Así, un valor inferior a 1 indica baja especialización y si es superior a 1, existe dicha especialización.

En este sentido, Alemania presenta un mayor número de patentes sobre reciclado de plásticos que el resto de los países europeos; sin embargo, su índice de ventaja tecnológica revelada es inferior a 1, lo que indica que carece de una especialización real en materia de reciclado de plásticos. Hay que destacar que otros países europeos, con un menor número de patentes como España, tiene un índice de 1,3, señalando así su alto nivel de especialización en esta temática.

Orígenes de las familias de patentes internacionales relacionadas con el reciclado de plásticos (2010-2019) | TABLA 6

País	Nº	Porcentaje	Número por millón de habitantes	Índice de ventaja tecnológica revelada
Estados Unidos	4.640	30,8	13,9	1,52
EU27	3.829	25,4	8,6	1,13
Japón	2.665	17,7	21,6	0,77
Alemania	1.242	8,2	14,8	0,83
República Popular China	801	5,3	0,5	0,48
República de Corea	749	5,0	14,5	0,59
Francia	644	4,3	9,8	1,19
Holanda	440	2,9	25,6	2,27
Reino Unido	436	2,9	25,6	2,27
Italia	349	2,3	5,7	1,26
Bélgica	219	1,5	18,9	2,4
España	**151**	**1,0**	**3,2**	**1,3**
Suiza	141	0,9	16,2	0,77
Dinamarca	105	0,7	18,1	1,21
Suecia	89	0,6	8,8	0,48

Fuente: European Patent Office

71 Patents for tomorrow's plastics. Global innovation trends in recycling, circular design and alternative sources European Patent Office. October 2021. ISBN 978-3-89605-277-3

El gran número de patentes en reciclado químico demuestra el interés por parte de la industria y del campo científico en estas tecnologías y respalda el crecimiento esperado de su implantación en el mercado

Respecto a la evolución en las patentes, las de reciclado mecánico (reciclado plástico a producto) fueron dominantes hasta la década de los 90. A partir de esta fecha, las patentes relacionadas con reciclado químico las superaron, tal como se muestra en la siguiente figura.

Número de familias de patentes relacionadas con la valorización de los residuos y los diferentes tipos de residuos entre 1980 y 2019 | FIG. 21

Fuente: European Patent Office

Número de familias de patentes relacionadas con el reciclado químico entre 1980 y 2019 | FIG. 22

Fuente: European Patent Office

El gran número de patentes en reciclado químico demuestra el interés por parte de la industria y del campo científico en estas tecnologías y respalda el crecimiento esperado de su implantación en el mercado.

En las figuras anteriores, se muestra el número de familias de patentes relacionadas con el reciclado químico, dividido en dos tipos de tecnologías "plastic to feedstock" y "plastic to monomer". El denominado "plastic to feedstock" o plástico a materia prima, hace referencia a la obtención de materias primas tipo nafta que se obtiene, por ejemplo, en una pirólisis, y que luego necesitan pasar por otros procesos de craqueo y refino para obtener el monómero final. El denominado "plastic to monomer" o plástico a monómero hace referencia a procesos que directamente obtienen el monómero, como es por ejemplo la solvólisis (aunque también hay algunas pirólisis de las que se puede extraer directamente el monómero como por ejemplo la del PS).

6 Tendencias del reciclado químico

El reciclado químico es una tecnología incipiente industrialmente, pero con un potencial de crecimiento claro. En los próximos años se van a implementar plantas industriales en todos los continentes que van a posibilitar un descenso claro de las cantidades de residuos plásticos depositadas en vertedero o incluso en incineradoras, dando lugar a una recuperación de recursos.

Si bien las grandes cantidades de capacidad de producción en reciclado químico parecen centradas en procesos de tipo craqueo térmico, los procesos de solvólisis también se desarrollarán principalmente para residuos de poliéster y poliuretano. Este crecimiento exige una estrecha colaboración entre empresas químicas, desarrolladores de tecnologías, gestores de residuos y recicladores. Así, en la mayoría de los casos, estos materiales reciclados estarán en el portfolio de los grandes fabricantes de materias primas proporcionando plásticos con diferentes porcentajes de reciclado de diferentes orígenes y bajo el criterio de calidad y sostenibilidad de las empresas.

Estos materiales y en muchos casos sus procesos, vendrán avalados por certificaciones y sellos reconocidos a nivel internacional que permitirán la trazabilidad de éstos y asegurarán su calidad y aplicabilidad concreta (cumplimiento de propiedades y de exigencias legislativas para diferentes aplicaciones).

Los propios procesos irán evolucionando paulatinamente hacia tecnologías donde haya una reducción del consumo energético: esta reducción vendrá de la propia modificación de procesos, como el empleo de procesos acoplados con microondas, o mediante el uso de catalizadores selectivos. Esta minimización energética producirá una disminución de la huella de carbono del proceso y de los materiales, dando lugar a materiales más sostenibles y con un menor impacto ambiental. Además, tendrá una repercusión importante en los propios costes del proceso y del producto.

En paralelo, se espera que vayan desarrollándose procesos relacionados con otras tecnologías con la misma finalidad: la de aumentar la eficiencia. Entre estos procesos destacan los de polimerización parcial en la que no se requerirá un craqueo hasta monómero obteniendo directamente polímeros con menor peso molecular. Estos intermedios requerirán, a su vez, una repolimerización menor, lo que permitirá una reducción económica y ambiental en ambos procesos. De igual forma, esta despolimerización parcial servirá para obtener productos reciclados a medida, con un índice de fluidez o una viscosidad, por ejemplo, diferente a los residuos de partida.

En la mayoría de los casos, los materiales reciclados estarán en el portfolio de los grandes fabricantes de materias primas proporcionando plásticos con diferentes porcentajes de reciclado

En la misma línea, se establece el reciclado químico para obtener sustancias que puedan ser el punto de partida de un polímero de la misma naturaleza del que procedan u otro distinto.

Esta posibilidad de reciclado y posterior formulación a medida puede facilitar la entrada de polímeros reciclados diferentes a los de los residuos de partida o en otro sector, desligando así la recogida y la propia dependencia de los sectores. Por ejemplo, un residuo de poliéster del sector textil puede reciclarse químicamente para obtener un poliol que luego sea empleado en la fabricación de un poliuretano para el sector de la construcción.

Otra tendencia es el desarrollo de la mecanoquímica en el reciclado químico. Ésta permite la reducción drástica de disolventes y tiempos de proceso que será fundamental para aumentar la viabilidad y la implantación industrial de procesos de solvólisis. De forma adicional, el desarrollo y el uso de líquidos iónicos debe permitir un aumento de la viabilidad de procesos que emplean actualmente disolventes para el craqueo químico.

La combinación de algunas de estas tecnologías augura un futuro más que prometedor al reciclado químico, con procesos más eficientes y sostenibles y con menores costes de operación.

En los próximos años se van a implementar plantas industriales en todos los continentes que van a posibilitar un descenso claro de las cantidades de residuos plásticos depositadas en vertedero o incluso en incineradoras

7 Marco necesario para que el desarrollo del reciclado químico sea una realidad

El reciclado químico es una solución de reciclaje complementaria que nos permitirá aumentar la circularidad de los plásticos al final de su vida útil y reducir su huella de carbono.

Sin embargo, esta tecnología requiere todavía de la adaptación tanto del mercado, como de la legislación de residuos actual. Existen todavía muchas preguntas abiertas respecto a esta tecnología emergente, su viabilidad económica o el marco regulatorio que le afecta.

En este sentido, es necesario un marco regulatorio estable y predecible que defina el reciclado de una manera neutral desde el punto de vista de la tecnología, para permitir el desarrollo de nuevas alternativas, además de las existentes, y garantizar que con su aportación se alcanzan los objetivos de la UE en materia de reciclado y contenido reciclado. Para ello, este marco regulatorio debe abordar diversas cuestiones:

- Definición clara y armonizada de reciclado químico.
- Desarrollo de una metodología apropiada, aceptada y armonizada para dar cumplimiento a las exigencias de los clientes en cuanto a contenido en reciclado y su control. Esta metodología debe ser certificable, clara y reconocida para la medición y reporte del uso de polímeros circulares a partir del reciclado químico, como es el balance de masas. Esto resulta fundamental ya que el reconocimiento del reciclado químico por sí mismo no es suficiente, debe ir acompañado del reconocimiento del balance de masas como instrumento de seguimiento.
- Reconocimiento del reciclado químico como complemento al reciclado mecánico, en la jerarquía de residuos. Es necesario pues, aclarar el aspecto de diferenciación entre reciclado químico y valorización energética, aunque se trate de un mismo proceso, cuando la finalidad de los productos obtenidos es diferente. Éste es el caso, por ejemplo, de la pirólisis, que permite obtener como productos un aceite pirolítico o gas de síntesis (syngas) que puede dar lugar a monómeros (reciclado químico) o a productos que pueden utilizarse como combustibles (valorización energética). La valorización energética quedaría por debajo del reciclado mecánico o químico en la jerarquía de residuos y por encima de la incineración y del depósito en vertedero.

Es necesario un marco regulatorio estable y predecible que defina el reciclado de una manera neutral desde el punto de vista de la tecnología, para permitir el desarrollo de nuevas alternativas además de las existentes y garantizar que con su aportación se alcanzan los objetivos de la UE en materia de reciclado y contenido reciclado

- Desarrollo de criterios claros de "fin de condición de residuo" y consecuente desarrollo legislativo para que, de manera directa y harmonizada en todo el territorio nacional, un residuo plástico que se recicle químicamente pierda su condición de residuo al transformarse en un nuevo producto.
- Inclusión clara del reciclado químico en legislaciones básicas, como REACH[72] y plástico en contacto con alimentos, entre otras, con una redacción que posibilite en la práctica el reciclado químico, incluyendo para él la misma mención expresa del desarrollo de estándares y normas de metodología y trazabilidad donde aún no las haya.
- Legislación armonizada y tecnológicamente neutra, que permita, además, el desarrollo de nuevas alternativas de reciclado adicionales a las existentes y a tiempo para poder disponer de inversiones con las que implementarlas y cumplir con los objetivos europeos de clima y economía circular.
- Comparación realizada mediante un enfoque de análisis de ciclo de vida del impacto ambiental de los diferentes fines de vida de los residuos y de los materiales vírgenes respecto a los reciclados, sobre todo cuando la alternativa para algunos residuos es la incineración o el depósito en vertedero.
- Compromiso real a lo largo de toda la cadena de valor, incluidos los agentes públicos y privados relacionados con la normativa y la legislación. Se incluye la colaboración en innovación y la transferencia tecnológica con el objetivo de compartir información y crear un vínculo para el desarrollo de tecnología y procesos principales y auxiliares.
- Inclusión dentro de los pliegos de compra pública innovadora y verde de productos fabricados con plástico reciclado, aceptando todas las tecnologías de reciclado existentes, incluido el reciclado químico.
- Impulso en las inversiones que permita la construcción y puesta en marcha de nuevas plantas industriales.
- Promoción de ayudas que permitan, mediante una cofinanciación público-privada, el desarrollo de proyectos de I+D+i que ayuden en el avance de procesos más eficientes y eficaces.
- Una sociedad en su conjunto más concienciada sobre la importancia de no abandonar en el medioambiente los residuos y sobre la importancia de su participación en la recogida selectiva, que permita el reciclado posterior de los residuos plásticos y su incorporación al proceso productivo como recursos.
- Mejora de los procesos de recogida selectiva y selección de residuos.
- Simplificación de los procesos administrativos de concesión de la condición fin de residuo para poder comercializar los productos obtenidos y que computen como reciclado.
- Reducción de los plazos para obtener las autorizaciones ambientales y licencias necesarias para la puesta en marcha de nuevas plantas industriales.

72 Reglamento (CE) No 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo de 18 de diciembre de 2006 relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH), por el que se crea la Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos, se modifica la Directiva 1999/45/CE y se derogan el Reglamento (CEE) no 793/93 del Consejo y el Reglamento (CE) no 1488/94 de la Comisión, así como la Directiva 76/769/CEE del Consejo y las Directivas 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE y 2000/21/CE de la Comisión. Diario Oficial de la Unión Europea L 396 de 30 de diciembre de 2006

Todas estas medidas ayudarán a la implantación del reciclado químico y al propio desarrollo económico e industrial del país.

Hay que destacar que España es actualmente el país de la Unión Europea que está liderando el reciclado químico desde la Administración Pública al reconocer a esta tecnología desde una PNL (proposición No de Ley) del 2021[73]. De forma adicional en la Ley de Residuos y Suelos Contaminados para una Economía Circular, se reconoce al material obtenido desde reciclado químico al mismo nivel que el obtenido mediante reciclado mecánico, en cuanto a la exención para el impuesto de envases de plástico no reutilizables. Es necesario seguir dando pasos en esta línea para avanzar y ayudar a la implantación real de esta tecnología en España.

Cabe destacar dos fortalezas en España que deben favorecer la implantación del reciclado químico:

- Un sector químico fuerte, que dispone de ciertas tecnologías necesarias o adaptables al propio reciclado químico, que debe ser aprovechado. El sector químico español (CNAEs 20+21), es uno de los sectores industriales más consolidados de la economía española. Compuesto por más de 3.000 empresas, la industria química española experimentó en 2021 un crecimiento productivo del 5,9%, cerrando el ejercicio con una cifra de negocios anual de 77.241 millones de euros, lo cual representa, considerando adicionalmente sus efectos indirectos e inducidos, el 5,4% del Producto Interior Bruto actualmente. En paralelo, al crecimiento productivo, el nº de asalariados del sector creció hasta los 210.000 empleos directos, que ascienden hasta los 711.000 considerando también los indirectos e inducidos que generan, lo que equivale al 3,7% de la población activa asalariada. Esto fue posible, en gran medida, gracias a su capacidad exportadora, 44.000 millones de euros, que representa el 57% de la cifra de negocios, y a su clara apuesta por la inversión en I+D+i, al acumular el 26,8% del total industrial.

- Una cadena de valor fuerte y unida, que incluye a los fabricantes de materias primas, a los transformadores de materiales plásticos y a los recicladores mecánicos. Esta cadena de valor está compuesta por más de 4.000 empresas, con una facturación de 25.844 millones de euros, lo cual representa, considerando adicionalmente sus efectos indirectos e inducidos, el 2,7% del Producto Interior Bruto, y 90.000 empleos directos. Incluyendo indirectos e inducidos, la industria del plástico genera más de 255.000 empleos en España con una capacidad exportadora de 11.056 millones de euros.

Estos puntos pueden ser una diferenciación respecto al resto de países y una ventaja competitiva.

73 Diario de Sesiones del Congreso de los Diputados, nº 411 (Expediente 161/002363)

8 Los 10 mitos del reciclado químico

MITO 1

El reciclado químico no es reciclado, es valorización energética

Falso. Se trata de dos conceptos diferentes: reciclado químico y valorización energética, aunque ambos suponen una rotura de la cadena del polímero. Mediante esta rotura, en el reciclado químico se obtienen diferentes sustancias, excluyendo aquellas que se usan directamente como combustibles o energía. Si se producen combustibles o energía, se trata de valorización energética.
El reciclado químico, desde el punto de vista de la jerarquía de residuos, está por encima de la valorización energética y da lugar a materias primas circulares.

MITO 2

El reciclado químico sustituirá a corto plazo al reciclado mecánico

Falso. El reciclado químico es complementario al reciclado mecánico, no lo sustituye. Siempre que se pueda, se optará por el reciclado mecánico, pero cuando se parta de residuos muy mezclados - potencialmente contaminados-, no reciclables, termoestables o que precisen de requerimientos específicos como, por ejemplo, aquellos relacionados con seguridad alimentaria, se optará por el reciclado químico.

MITO 3

El reciclado químico es un proceso contaminante que libera sustancias tóxicas al medioambiente

Falso. El reciclado químico incluye una gran variedad de procesos químicos que están regulados para controlar su impacto al medioambiente.
La legislación europea y nacional regula estos procesos, lo que asegura su control y minimiza su impacto con el objetivo de proporcionar una reducción global de su huella ambiental.

MITO 4

El reciclado químico tiene una alta huella de carbono

Falso. Para calcular la huella de carbono se debe realizar un análisis de ciclo de vida completo. Si se compara el proceso de fabricación a partir de materia prima procedente de reciclado químico con el proceso de fabricación a partir de una materia prima virgen, la huella de carbono disminuye. En un proceso de pirólisis hay que comparar la huella de carbono del aceite de pirólisis con la del producción de nafta. En el caso de glicólisis hay que comparar la huella de carbono de producir el monómero con la de producir ese mismo monómero por un proceso tradicional.

MITO 5

El reciclado químico no es una realidad a escala industrial

Falso. Ya existen en el mercado productos que incorporan plásticos obtenidos a partir de reciclado químico. Hay plantas de diferentes procesos de reciclado químico que tratan toneladas de residuos al año y comercializan los materiales reciclados.

MITO 6

El reciclado químico es una tecnología con grandes emisiones de GEI

Falso. El reciclado químico puede evitar la incineración de plásticos y puede utilizarse como materia prima, evitando así la exploración de refino y reduciendo las emisiones de GEI asociadas a estos procesos, lo cual arroja un balance de emisiones favorable.
En este sentido, existen numerosos estudios científicos que muestran los beneficios de combinar el reciclado mecánico y el reciclado químico en términos de emisiones.

MITO 7

Los materiales plásticos reciclados químicamente no son competitivos frente al plástico virgen

Falso. El plástico reciclado químicamente es un nuevo material puesto en el mercado. Su precio será mayor, igual o menor que el plástico virgen según la oferta y demanda por lo que se autorregulará. La competitividad frente al plástico virgen será la suma de la parte ambiental y económica, incluyendo factores globales, como el coste de la gestión de residuos en otros procesos, como la incineración o el depósito en vertedero o impuestos al material virgen.

MITO 8

El reciclado químico es la solución mágica para reciclar todos los plásticos

Falso. El reciclado químico a priori se podría aplicar a todos los residuos. Sin embargo, deben buscarse soluciones a medida pues siempre hay una más adecuada, que en unos casos será reciclado mecánico y en otros, reciclado químico. Por tanto, se debe analizar caso por caso cuál es la solución óptima para los residuos plásticos y aplicar la ciencia midiendo el impacto ambiental mediante herramientas reconocidas como el análisis de ciclo de vida.

MITO 9

El reciclado químico no cuadra con una economía circular

Falso. El reciclado químico supone un gran avance hacia la economía circular. De hecho, permite volver a introducir recursos en el sistema productivo y dar una nueva vida a los residuos, aportando materias primas circulares y desligando al sector del plástico de los recursos no renovables.

MITO 10

España no tiene capacidad para liderar la tecnología de reciclado químico

Falso. España presenta todos los factores para liderar la tecnología de reciclado químico:

1. Una industria química y del plástico fuerte y consolidada,
2. Una cadena de valor que trabaja en la misma dirección para crear un sistema sostenible, que ha realizado inversiones y que apuesta por esta tecnología,
3. Una Administración Pública que ha mostrado su apoyo a esta tecnología a través del respaldo económico mediante instrumentos específicos como por ejemplo el PERTE,
4. Un sector científico-tecnológico, formado por universidades, OPIs y centros tecnológicos, que son expertos y referentes mundiales en reciclado químico y sus tecnologías auxiliares.

Abreviaturas

BHET Bis(2-hidroxietil)tereftalato

CPA Circular Plastics Alliance

GEI Gases de Efecto Invernadero

PA Poliamida

PC Policarbonato

PE Polietileno

PERTE Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica

PET Polietilentereftalato

PLA Ácido poliláctico

PMMA Polimetil metacrilato

PP Polipropileno

PRFV Poliéster reforzado con fibra de vidrio

PRFC Poliéster reforzado con fibra de carbono

PS Poliestireno

PU Poliuretano

RAP Responsabilidad Ampliada del Productor

RSU Residuo Sólido Urbano

TRL Technology Readiness Level (nivel de madurez tecnológica en castellano)

UV Radiación Ultravioleta

GLOSARIO

Ecomodulación: Herramienta para ajustar las tarifas de los sistemas de RAP a una serie de criterios de sostenibilidad en el diseño del producto.

Enzima: Molécula orgánica que actúa como catalizador de reacciones químicas, acelerando la velocidad de reacción. Normalmente es de naturaleza proteica y es extremadamente selectiva con los sustratos o moléculas sobre las que actúa para obtener los denominados productos.

Monómero: Sustancia química que es la unidad básica que constituye, por repetición, un polímero.

Oligómero: Molécula que presenta un pequeño número de unidades repetidas o monómeros.

Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica: Instrumento de colaboración público-privada definido por el Real Decreto-ley 36/2020 de 30 de diciembre.

Polimerización: Reacción en la que dos o más moléculas se combinan para formar otra en la que se repiten unidades estructurales de las moléculas originales

Polímero: Molécula (macromolécula) compuesta por una cadena de un gran número de unidades repetidas o monómeros.

Polímero por adición: Polímero fabricado por poliadición, donde la molécula entera de monómero pasa a formar parte del polímero, sin pérdida de átomos. La composición química de la cadena resultante es igual a la suma de las composiciones químicas de los monómeros que la conforman. Ejemplos de polímeros de estas características son el PE o el PP.

Polímero por condensación: Polímero fabricado por policondensación, donde parte de la molécula de monómero se pierde cuando pasa a formar parte del polímero. Normalmente se pierde una molécula pequeña, como por ejemplo el agua. Ejemplos de polímeros de estas características son la PA o el PET.

Plástico: Combinación de uno o más polímeros y aditivos.

Reciclado por disolución: Proceso de valorización en el que los residuos se someten a la acción de agentes químicos como por ejemplo disolventes produciendo una disolución de polímeros y/o aditivos.

Reciclado mecánico: Proceso de valorización en el que los residuos se someten a una serie de etapas de tratamiento mecánico (como trituración, lavado, secado, separación o fundido) sin que exista un cambio en su cadena, lo que da lugar a una materia prima plástica reciclada.

Reciclado químico: Conjunto de tecnologías que permiten descomponer los residuos plásticos y otros polímeros procedentes de otros flujos de residuos en sus componentes básicos y transformarlos en valiosas materias primas secundarias para producir nuevos productos químicos y plásticos.

Residuo Sólido Urbano: Residuo generado en domicilios particulares, comercios, oficinas y servicios, así como todos aquellos que no tengan la calificación de peligrosos y que, por su naturaleza o composición, puedan asimilarse a los producidos en los anteriores lugares o actividades.

Sustancia heredada (legacy substance): Aditivos que actualmente no están autorizados, pero que lo estuvieron en el pasado (o pueden dejar de estarlo en el futuro) y que pueden suponer una limitación para las posibles aplicaciones y comercialización de los plásticos reciclados.

Valorización energética: Proceso térmico por el que se produce la ruptura de enlaces de la cadena de los residuos plásticos para obtener energía. La energía obtenida debe ser superior a la energía empleada para producir la ruptura de la cadena.

Vertedero: Espacio donde se deposita un residuo, sobre o bajo tierra, con el fin de eliminarlo.

Vida útil: El periodo de duración estimada que un objeto o producto puede tener, cumpliendo correctamente con la función para el cual ha sido creado.

Relación de **Figuras**

Figura 1 | Ejemplo de estructura de polímeros 10

Figura 2 | Ejemplo de reacción de polimerización por adición 10

Figura 3 | Ejemplo de reacción de polimerización por condensación 10

Figura 4 | Estructura por tipo de polímero, de izquierda a derecha, termoplástico, termoestable y elastómero 10

Figura 5 | Demanda de plásticos por parte de transformadores de los Estados miembros de la Unión Europea, Reino Unido, Noruega y Suiza 12

Figura 6 | Residuos plásticos posconsumo recogidos en España (2021) 13

Figura 7 | Evolución de la gestión de residuos plásticos en España 14

Figura 8 | Jerarquía de residuos 15

Figura 9 | Tipos de reciclado 19

Figura 10 | Esquema de polimerización y despolimerización (un tipo de reciclado químico) 20

Figura 11 | Tipos de reciclado químico 21

Figura 12 | Esquema de un proceso de craqueo térmico (termólisis) 21

Figura 13 | Ejemplo de reacción de despolimerización 21

Figura 14 | Ejemplo de reacción de craqueo biológico 22

Figura 15 | Cadena de valor y tipos de reciclado 23

Figura 16 | Balance de Masas aplicado a pirólisis 30

Figura 17 | Esquema de Balance de Masas aplicado a solvólisis 31

Figura 18 | Índice de reciclaje de envases plásticos por países en 2018 32

Figura 19 | Plantas de Reciclado Químico (existentes y previstas) 35

Figura 20 | Perspectiva de crecimiento en el número de plantas de reciclado avanzado hasta 2025 36

Figura 21 | Número de familias de patentes relacionadas con la valorización de los residuos y los diferentes tipos de residuos entre 1980 y 2019 40

Figura 22 | Número de familias de patentes relacionadas con el reciclado químico entre 1980 y 2019 41

Relación de Tablas

Tabla 1 | Uso de aditivos en materiales plásticos y la función que aportan 11

Tabla 2 | Procesos de reciclado químico por tipo de polímero. 22

Tabla 3 | Ejemplos de plantas de reciclado químico que operan en España 33

Tabla 4 | Empresas emergentes con tecnología de reciclado químico en España 33

Tabla 5 | Nuevas plantas de reciclado químico previstas en España 34

Tabla 6 | Orígenes de las familias de patentes internacionales relacionadas con el reciclado de plásticos (2010-2019) 39

Tabla 7 | Ejemplos de proyectos financiados de reciclado químico de plásticos con socios españoles 55

Tabla 8 | Centros de investigación referentes en reciclado químico de plásticos en España 57

9 Anexos

Anexo I: Certificaciones de Balance de Masas

Existen certificaciones internacionales de balance de masas aplicables a la cadena de valor. Inicialmente fueron desarrolladas para el sector de la biomasa y poco a poco fueron ampliando su alcance. Actualmente se pueden aplicar a los residuos plásticos y a su reciclado químico, cubriendo toda la cadena de valor. Éstas certifican el contenido en reciclado a lo largo de dicha cadena, diferenciando también los flujos que son de reciclado químico de los de valorización energética.

Estas certificaciones tienen 4 fases diferenciadas.

Fase **1**	**Alcance e inicio del proyecto.** Se define el alcance del proyecto.
Fase **2**	**Auditoría**. Esta auditoría es tanto documental como presencial para comprobar la operatividad del sistema.
Fase **3**	**Medidas correctoras.** Tras la auditoría se emite un informe con las no conformidades o desviación; la empresa debe tomar las acciones correctoras correspondientes.
Fase **4**	**Certificación final.** Se comprueba la adopción de las acciones correctoras frente a las no conformidades o desviaciones y se toma la decisión respecto a la certificación final.

Hay que tener en cuenta que esta certificación está relacionada con toda la cadena de valor, por lo que es clave la relación proveedor-empresa-cliente.

Las certificaciones internacionales actualmente más reconocidas son: ISCC Plus[74] , REDcert2[75] y 2BSvs[76]

74 https://www.iscc-system.org/
75 https://www.redcert.org/
76 https://www.2bsvs.org/

Anexo II: Ejemplos de proyectos financiados de reciclado químico de plásticos con participación de entidades españolas | TABLA 7

En la siguiente tabla se muestran algunos ejemplos de proyectos a nivel europeo con participación de socios españoles y proyectos nacionales de reciclado químico

Proyecto	Ámbito	Entidad subvencionadora (Nº Expediente)
BIOICEP: Bio Innovations of a Circular Economy for Plastics https://www.bioicep.eu/	Europeo	Commission of the European Communities (870292)
BIOMAT: An Open Innovation Test Bed for Nano-Enabled Bio-Based PUR Foams and Composites https://cordis.europa.eu/project/id/953270 https://biomat-testbed.eu/	Europeo	Commission of the European Communities (953270)
CIRCPACK: A new circular economy for the plastic packaging sector https://circpack.eu/	Europeo	Commission of the European Communities (730423)
DECOAT: Recycling of coated and painted textile and plastic materials https://decoat.eu/	Europeo	Commission of the European Communities (768573)
ECOXY: Bio-based recyclable, reshapable and repairable (3R) fibre-reinforced EpOXY composites for automotive and construction sectors https://cordis.europa.eu/project/id/744311 https://ecoxy.eu/	Europeo	Commission of the European Communities (744311)
ELIOT: End of Life (EoL) for biomaterials https://project-eliot.eu/	Europeo	Commission of the European Communities (886416)
ICAREPLAST: iCAREPLAST: Integrated Catalytic Recycling of Plastic Residues Into Added-Value Chemicals https://www.icareplast.eu/	Europeo	Commission of the European Communities (820770)
INN-PRESME: Open INnovation ecosystem for sustainable Plant-based nano-enabled biomateRials deploymEnt for maSS MarkEt industry https://www.inn-pressme.eu/	Europeo	Commission of the European Communities (SEP-210637309)
LIFE ECOTEX: Demonstration of polyester of footwear waste recycling into new textile products using glycolysis technology http://www.life-ecotex.eu/index.php/es/	Europeo	Commission of the European Communities (LIFE15 ENV/ES/000658)
MIXUP: MIXed plastics biodegradation and UPcycling using microbial communities https://cordis.europa.eu/project/id/870294	Europeo	Commission of the European Communities (870294)
MULTICYCLE: Advanced & sustainable recycling processes and value chains for plastic-based multi-materials http://multicycle-project.eu/	Europeo	Commission of the European Communities (820695)
PLAST2bCLEANED: PLASTtics to be CLEANED by sorting and separation of plastics and subsequent recycling of polymers, bromine flame retardants and antimony trioxide https://plast2bcleaned.eu/	Europeo	Commission of the European Communities (821087)

Proyecto	Ámbito	Entidad subvencionadora (Nº Expediente)
POLYNSPIRE: Demonstration of innovative technologies towards a more efficient and sustainable plastic recycling https://www.polynspire.eu/	Europeo	Commission of the European Communities (820665)
PUReSmart: Recycling long-lasting thermoset polyurethane foam https://www.puresmart.eu/	Europeo	Commission of the European Communities (814543)
REPLAXTIC EF-SE: Plastic upcycling for sustainable new generation batteries https://cordis.europa.eu/project/id/101028975	Europeo	Commission of the European Communities (101028975)
SOL-REC2: Innovative digital watermarks and green solvents for the recovery and recycling of multi-layer materials https://cordis.europa.eu/project/id/101003532	Europeo	Commission of the European Communities (101003532)
UPLIFT: sUstainable PLastIcs for the Food and drink packaging indusTry https://upliftproject.eu/	Europeo	Commission of the European Communities (SEP-210659299)
DICKENS: Investigación y Desarrollo Integral de Composites a partir de fuEntes NaturaleS	Nacional	CDTi (CDTIE2019-015363)
EROS: Economía ciRcular en compOSites: del sector eólico y aeronáutico a la industria cerámica y el transporte	Nacional	AEI (RTC2019-007206-5)
FOAM2FOAM: Economía circular de espumas poliuretano vía reciclado químico	Nacional	MINECO (RTC-2017-6755-5)
Investigación de nuevas tecnologías de reciclado y valorización de residuos plásticos complejos	Nacional Nacional	CDTi (MIG-20211051)
RED OSIRIS: Cooperación estratégica en tecnologías para la economía circular de composites y de materiales plásticos complejos de alto valor añadido		CDTi (CER-20211009)
Enhancing circularity by using renewable monomers and sustainable Chemical strategies of polymer upcycling	Nacional	AEI (PLEC2021- 007793)
Valorización pirolítica de residuos termoplásticos complejos no reciclables mecánicamente	Nacional	AEI (PLEC2021-008062)
Síntesis y reciclado enzimático de polímeros furánicos biobasados	Nacional	AEI (PLEC2021- 007690)
BIOREACT: Reciclado biológico de residuos plásticos de almidón mediante su fermentación a ácido láctico	Autonómico	AVI (INNEST/2021/9)
ENTOMOPLAST: Microbiomas de insectos como herramienta para la valorización de residuos plásticos de envases multicapa	Autonómico	AVI (INNEST/2021/334)
LISOL: Soluciones basadas en líquidos iónicos para diversificar las oportunidades de la industria vasca	Autonómico	Gobierno Vasco
NEOREC: Nuevos enfoques de reciclado para residuos complejos	Autonómico	IVACE (IMDEEA/2021/96)
Obtención de polioles verdes a partir del reciclado químico de residuos poliuretano	Autonómico	AVI (INNCAD/2021/84)
RECITURF: Reciclado de césped artificial mediante procesos biológicos	Autonómico	AVI (INNEST/2020/29)
REQUIPLAST: Reciclaje químico de residuos plásticos. Un enfoque real de la economía circular de los plásticos	Autonómico	IHOBE
RECIPAM: Reciclado de poliamida de alta calidad a partir de residuos de envases multicapa https://www.aimplas.es/proyectos-desarrollados/reciclado-de-poliamida-de-alta-calidad-a-partir-de-residuos-de-envases-multicapa/	Autonómico	AVI (INNEST00/19/097)

Anexo III: Ejemplos de centros de investigación nacionales referentes en reciclado químico de plásticos | TABLA 8

En la siguiente tabla se muestra una relación de universidades, centros tecnológicos y organismos públicos de investigación referentes en reciclado químico de plásticos en España.

Entidad
AIMPLAS[1], Instituto Tecnológico del Plástico
AITEX[2] Asociación Industrial de la Industria Textil
CARTIF[3]
CENER[4], Centro Nacional de Energías Renovables
CIDAUT[5], Fundación para la Investigación y Desarrollo en Transporte y Energía
CIDETEC[6]
EURECAT[7]
GAIKER[8]
Instituto de Catálisis y Petroleoquímica[9] (ICP-CSIC)
Instituto de Ingeniería de los Procesos Químicos[10], Universidad de Alicante
Instituto de Tecnología Química (ITQ)[11], centro mixto de la Universitat Politècnica de València (UPV) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)
ITAINNOVA[12], Instituto Tecnológico de Aragón
TECNALIA[13]
Departamento Química Inorgánica[14] de la Universidad de Alicante
Departamento[15] de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada de la Universidad de Cantabria
Grupo SUPREN[16] del Departamento de Ingeniería Química y Medioambiente de la Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco
Grupo de Ingeniería Química y Ambiental[17], Universidad Rey Juan Carlos
Grupo de investigación en Tecnología y Sostenibilidad de Materiales (MATS)[18] del Departamento de Ingeniería Quimica, Universidad de Valencia

1 https://www.aimplas.es/
2 https://www.aitex.es/
3 www.cartif.es
4 www.cener.com
5 https://www.cidaut.es/
6 https://www.cidetec.es/
7 https://eurecat.org/es/
8 http://www.gaiker.es/default.aspx
9 https://icp.csic.es/es/
10 https://iipq.ua.es/
11 https://itq.upv-csic.es/
12 www.itainnova.es
13 https://www.tecnalia.com/
14 https://dqino.ua.es/es/
15 https://web.unican.es/departamentos/citimac
16 https://www.ehu.eus/es/web/supren/hasiera
17 http://www.giqa.es/
18 https://www.uv.es/uvweb/departamento-ingenieria-quimica/es/investigacion/grupos-investigacion/grupo-investigacion-tecnologia-materiales-sostenibilidad-mats-/presentacion- 1286186264647.html

Reciclado Químico en España:

Apostando por un futuro circular

PLASTICS EUROPE
Enabling a sustainable future

feiQue
Federación Empresarial de la Industria Química Española

Informe realizado por: AIMPLAS

Con el apoyo de: EsPlásticos · SUSCHEM ES Química Sostenible · forética · Foro Química y Sociedad · RSE · Smart Chemistry Smart Future · EXPOQUIMIA Encuentro Internacional de la Química · EQUIPLAST Encuentro Internacional del Plástico y el Caucho

© 2022

Reciclado Químico en España:

Apostando por un futuro circular

Informe realizado por:

AIMPLAS

PLASTICS EUROPE
Enabling a sustainable future

feiQue
Federación Empresarial de la Industria Química Española