

Reciclado de neumáticos: transformación de un residuo en un recurso

Autores: Roberto Pérez Aparicio,
Leticia Saiz Rodríguez

Departamento de Desarrollo de Mercados y Nuevas Aplicaciones

SIGNUS Ecovalor S.L.

C/ Caleruega, 102, 5º - 28033 Madrid, España

rperez@signus.es, lsaiz@signus.es

Resumen

Los neumáticos al final de su vida útil (NFVU) son mucho más que simples residuos, son fuente de recursos materiales y energéticos. Múltiples son las ventajas que presenta la utilización de materiales procedentes de NFVU, en particular el caucho. Las numerosas aplicaciones en diversos nichos de mercado reflejan la creciente consolidación del caucho de NFVU como material de interés tecnológico e industrial. Recientes desarrollos en nuevas tecnologías e innovadores procesos de reciclaje y valorización abren nuevas perspectivas para el caucho de NFVU en aplicaciones de alto valor añadido. SIGNUS Ecovalor, como sistema colectivo de gestión de neumáticos fuera de uso, se presenta como actor fundamental en el reciclado de neumáticos y partícipe del cumplimiento de las estrategias de economía circular para la utilización de



este residuo como un recurso, reduciendo así el uso de las fuentes naturales no renovables.

Palabras Clave: Caucho, neumático al final de su vida útil, reciclado, valorización material

Abstract

End-of-life tyres (ELT) are much more than just waste, they are source of material and energy resources. There are many advantages in using materials from ELTs, particularly rubber. The numerous applications in different market niches reflect the increasing growth of ELT rubber as a material of technological and industrial interest. Recent developments in new technologies and innovative recycling and recovery processes open up new perspectives for ELT rubber in high value-added applications. SIGNUS Ecovalor, as a collective system for the management of used tyres, is a key player in tyre recycling and the fulfilling of the circular economy strategies for the use of this waste as a resource, thus reducing the use of non-renewable natural resources.

Keywords: Rubber, end-of-life tyre, recycling, material recovery

Introducción

Actualmente, cada vez es más evidente el agotamiento de determinados recursos naturales y combustibles fósiles, resultado del sistema lineal de la economía global (extracción-fabricación-consumo-desecho). Por ello, es urgente que el uso eficaz y responsable de las materias primas y la protección medioambiental sean actualmente las principales preocupaciones en las que se basen las estrategias económicas. Así, la economía circular propone un nuevo modelo de sociedad que utiliza de manera sostenible las materias primas y la energía, siendo su objetivo la eficiencia del uso de los recursos y la minimización de los residuos. El impulso de una mayor reutilización, reciclaje y valorización de los materiales supone un gran reto científico y tecnológico.

La Comisión Europea presentó en diciembre

de 2015 el Plan de Acción para la Economía Circular que incluye 54 medidas y está basado en tres ejes fundamentales [1]: (i) ecodiseño y análisis de ciclo de vida, (ii) reutilización de agua y (iii) minimización y valorización de residuos. En este sentido, el Gobierno de España está elaborando la Estrategia Española de Economía Circular, bajo la coordinación y liderazgo del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente y del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, en colaboración con el resto de ministerios implicados, las Comunidades Autónomas y la Federación Española de Municipios y Provincias. Así, con el fin de impulsar la transición hacia la Economía Circular, el pasado 18 de septiembre de 2017 se llevó a cabo la firma del *Pacto de la Economía Circular* [2] con objeto de implicar a los principales agentes económicos y sociales.

Para el caso particular de los residuos, en el modelo de economía circular se pretende maximizar las acciones de prevención y valorización de residuos y evitar su depósito en vertederos.

Debido a la creciente producción de neumáticos a nivel mundial, la aplicación de las bases de la economía circular en este sector es de gran importancia. En el caso de los neumáticos, la economía circular comienza en la etapa de diseño, pasando por la prolongación de su vida útil (mantenimiento, recauchutado, segundo uso), hasta la recogida y tratamiento como neumático al final de su vida útil (reciclado). Hasta 2003, los neumáticos al final de su vida útil podían depositarse en vertederos con algunas excepciones. Esta práctica se prohíbe definitivamente en 2006 también para los neumáticos triturados por la Directiva de vertederos de la Unión Europea (*Council Directive 1999/31/EC*). Actualmente, la legislación dirige al sector hacia la valorización y el reciclaje [3].

En España, durante años, los últimos poseedores de los neumáticos fuera de uso (NFU), normalmente los talleres, debían hacerse cargo de los mismos debiendo soportar los costes de su correcta gestión, bien por sus propios medios o pagando a un gestor au-



MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA

REAL DECRETO 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso

Los artículos 1 y 7 de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, facultan al Gobierno para fijar disposiciones específicas relativas a la producción y gestión de diferentes tipos de residuos, entre ellos los neumáticos fuera de uso, que por su peculiaridad requieren de una norma de desarrollo específica cuyo objetivo final es prevenir la incidencia ambiental de estos residuos.

Figura 1. Real Decreto 1619/2005 sobre la gestión de neumáticos fuera de uso.

torizado. El residuo generado suscitaba poco interés debido al poco desarrollo de los mercados de valorización y al alto coste de su procesamiento. Por todo ello, las infraestructuras de gestión eran casi inexistentes y solo se gestionaban correctamente los que generaban un margen de beneficio (recauchutado, venta de ocasión, etc.). El resto, en el mejor de los casos, terminaban en vertederos legales, ya que muchos otros se tiraban, enterraban o acumulaban de manera ilegal.

Los vertederos se fueron cerrando poco a poco a los NFU en aplicación de la legislación europea, que acertadamente les atribuye un fuerte potencial de valorización que debe ser aprovechado, ya sea como materia prima secundaria o como combustible alternativo. Sin embargo, la falta de alternativas al vertido fue deteriorando cada vez más la situación. Para remediar este peligroso panorama desde el punto de vista medioambiental y dado que los actores del mercado no garantizaban de manera espontánea la correcta gestión de todos los NFU generados, se desarrolló y publicó el *Real Decreto 1619/2005 (Figura 1)* de 30 de diciembre de 2005 [4] sobre gestión de NFU, que obliga a los productores a garantizar la recogida y correcta gestión de tantos NFU como neumáticos se introduzcan anualmente en el mercado de reposición.

Los principales fabricantes de neumáticos (BRIDGESTONE HISPANIA S.A., CONTINENTAL TIRES S.L., GOODYEAR DUNLOP TIRES ESPAÑA S.A., MICHELIN ESPAÑA Y PORTUGAL S.A., PIRELLI NEUMÁTICOS S.A.) participaron en la elaboración de este Real Decreto junto con distribuidores, gestores y otros sectores, acordando crear una *entidad operacional sin ánimo de lucro que diera respuesta definitiva al difícil reto de garantizar la correcta gestión y valorización de los NFU bajo su responsabilidad, con el mayor respeto a las leyes y al medioambiente*. Así surgió SIGNUS Ecovalor [5], del que pueden formar parte, como empresas adheridas y en igualdad de condiciones respecto de los socios fundadores, cualesquiera empresas productoras de neumáticos de reposición que lo soliciten. Actualmente son más de 300 las empresas adheridas a SIGNUS.

Actividad y Plan Estratégico de SIGNUS

SIGNUS Ecovalor (en adelante SIGNUS), sistema colectivo de gestión de neumáticos fuera de uso, ha gestionado desde el comienzo de su actividad en 2006, alrededor de 2 millones de toneladas de neumáticos fuera de uso. La cantidad total de neumáticos fuera de uso gestionada en 2016 fue de 189.259 toneladas [6], de las cuales 23.629 toneladas

se destinaron a preparación para su reutilización (bien como neumático de ocasión o bien como recauchutado). Del resto, que son los denominados neumáticos al final de su vida útil (NFVU), se reciclaron un total de 102.522 toneladas tras la separación de sus componentes (caucho, acero y fibra textil), 144 toneladas se destinaron a obra civil, 66.048 toneladas se utilizaron en el coproceso de fabricación de cemento, 2.432 toneladas para la generación de energía eléctrica y 22 toneladas a instalaciones de pirólisis (**Figura 2**).

La estrategia de SIGNUS va en línea de su misión como entidad gestora del sistema denominado SIGNUS y creada en virtud del Real Decreto 1619/2005 y consiste en:

- Garantizar un adecuado tratamiento del NFU desde que se genera hasta que deja de ser un residuo.
- Maximizar el valor de todos sus componentes a través del desarrollo de nuevas aplicaciones y nuevos mercados.

Así, SIGNUS está enfocado en conseguir la mayor eficiencia operacional y promover el desarrollo de productos y de mercados que absorban de manera sostenible las valiosas materias primas secundarias que se pueden obtener de los neumáticos al final de su vida útil: **transformar residuos en recursos**. Esta es una de las prioridades de SIGNUS y para ello cuenta con un departamento específico de Desarrollo de Mercados y Nuevas Aplicaciones dedicado plenamente a este objetivo [5].

Composición y tratamiento de los NFVU

Los neumáticos son productos de diseño complejo que han de cumplir exigentes requerimientos técnicos para adecuarse a las condiciones de uso. Por ello, los materiales empleados en la fabricación de un neumático han de cumplir exigentes requisitos de calidad, además de una prolongada durabilidad.

La composición de los neumáticos varía en función de su mercado de destino. Así, los contenidos medios en función del tipo de neumático se resumen en la **Tabla 1** [7,8]:

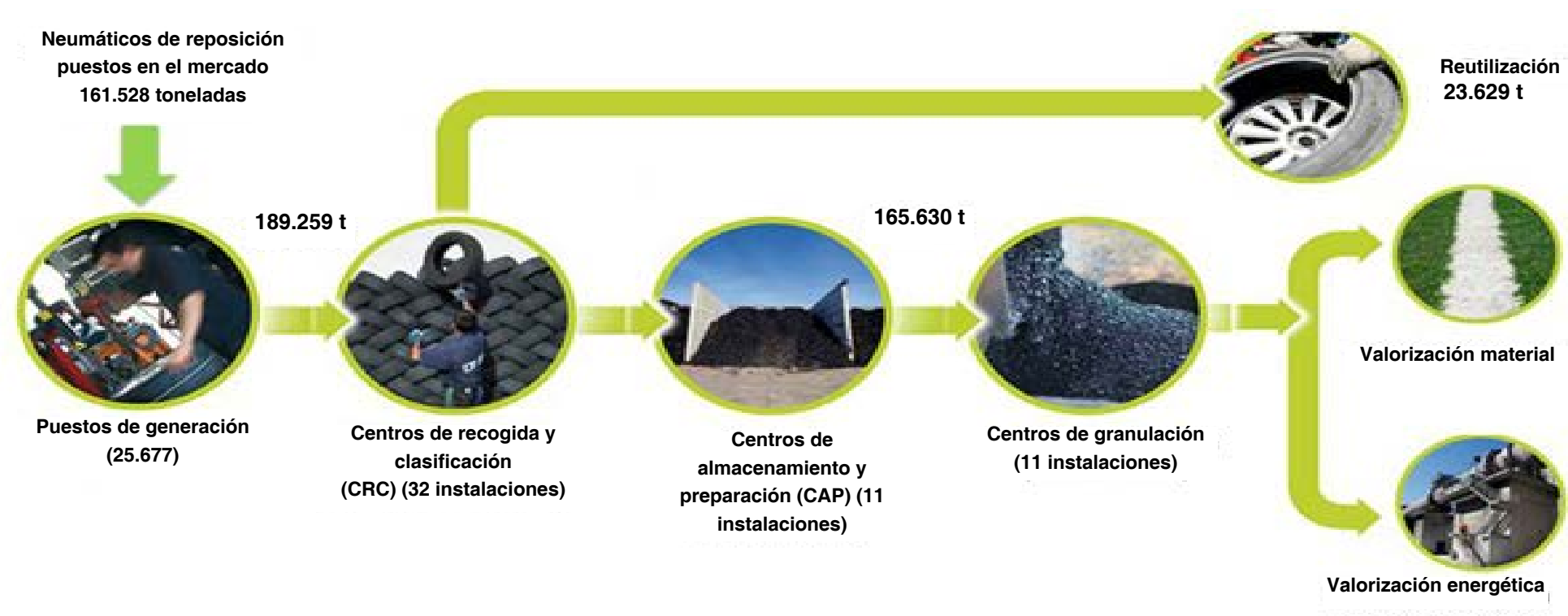


Figura 2. Gestión de NFU [6].

Tabla 1. Composición media en peso de un neumático de turismo y un neumático de camión [7,8].

COMPONENTE	Neumático de turismo % en peso	Neumático de camión % en peso
Caucho/Elastómeros	43%	42%
Negro de Carbono y Sílice	28%	24%
Acero	13%	25%
Textil	5%	-
Óxido de Zinc	2%	2%
Azufre	1%	1%
Acelerantes/antioxidantes	2,5%	2,2%
Ácido esteárico	1%	0,7%
Aceites	7%	1,6%

La complejidad de los materiales que componen un neumático implica complicados procesos de reciclado. El proceso de vulcanización con azufre necesario para la fabricación del neumático le confiere una gran estabilidad físico-química que dificulta la separación de los diferentes componentes: caucho, cargas reforzantes, aditivos, acero, fibra textil... Por ello, innovadores procesos de tratamiento para la separación/descomposición de los diferentes componentes son clave para un eficiente reciclado de los NFVU. Actualmente, el proceso de tratamiento de los NFVU sigue el esquema que se presenta en la **Figura 3**.

Así, una vez que los NFVU llegan a las plantas de tratamiento, se someten a diferentes procesos:

Trituración

Los neumáticos enteros, mediante una cinta transportadora, una pala o un pulpo, se intro-

ducen en una trituradora que generalmente se compone de un conjunto formado por uno o dos rotores o ejes de cuchillas que giran en sentido contrario para cortar el neumático. Dependiendo de las dimensiones de las cuchillas y de la criba que se coloque a la salida de la trituradora, se obtienen trozos de neumático de entre 20 y 400 mm.

Granulación

En una primera etapa, el triturado de neumático puede reducirse a tamaños de hasta por debajo de 25 mm mediante diferentes tipos de molinos. Además, durante ese proceso se separan prácticamente la totalidad del acero y parte del textil.

El material de caucho que no se ha separado para su comercialización en el proceso anterior se introduce bien en uno o varios molinos de granulación donde se consiguen tamaños por debajo de 10 mm o bien, en un molino de finos directamente para obtener polvo de caucho de tamaño inferior a 0,8 mm.

Existen dos métodos para la obtención de granulados finos y polvo de caucho: a temperatura ambiente o criogénico (baja temperatura con nitrógeno líquido). La granulación a temperatura ambiente es el método más habitual en el mercado español.

Separación de Acero y Fibra Textil

La separación del acero y las fibras textiles se lleva a cabo normalmente durante la granulación, aunque en algunas ocasiones, también en la trituración (dependiendo del diseño de cada planta). El acero se retira mediante separadores magnéticos. Por otro lado, aprovechando su textura y ligereza, la separación de la fibra textil se puede llevar a cabo mediante diferentes maneras: (i) cinta balística, que consiste en una cinta transportadora con un movimiento de vibración perpendicular al desplazamiento del material, que combinado con una inclinación adecuada, permite que el material más liviano (la fibra) se separe de los más pesados (acero y caucho); (ii) mesas o bandejas vibratorias que combinan la separación del caucho por tamizado con disposi-

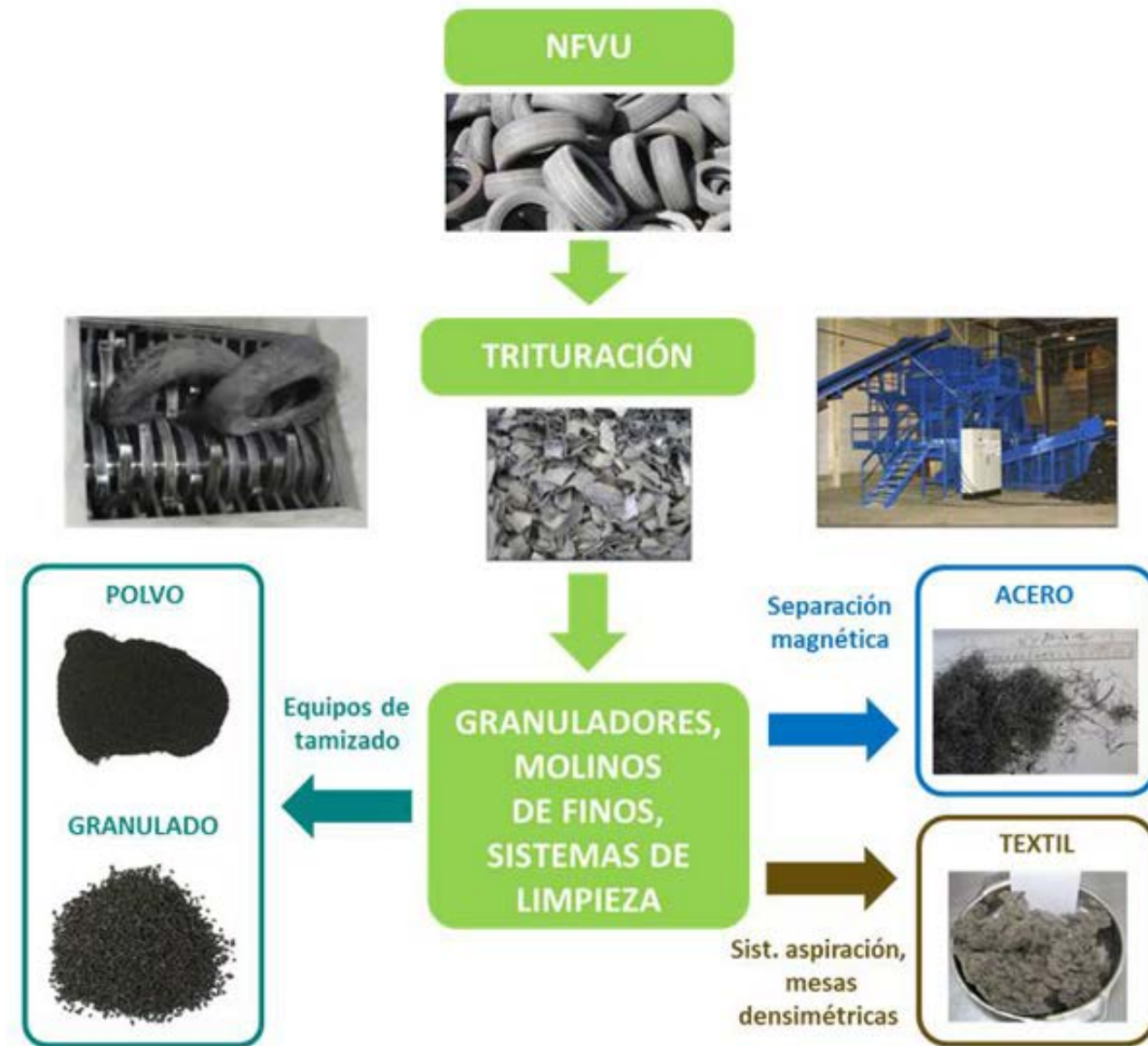


Figura 3. Proceso de tratamiento de NfVU.

tivos fluido-dinámicos basados en corrientes de aire o ciclones.

NfVU como recurso

Los NfVU no pueden considerarse como simples residuos, son fuente de recursos materiales y energéticos. Como se ha visto anteriormente, del tratamiento de los NfVU se obtienen tres materiales: caucho, acero y fibra textil.

Los tipos de caucho varían según el tipo de neumático y los compuestos utilizados, la relación del acero puede variar de un tipo de neumático a otro, y la fibra textil se utiliza generalmente en neumáticos de turismo y camiones ligeros.

A continuación, se hace una descripción de los materiales derivados de los NfVU prestando especial atención al caucho (componente mayoritario).

Acero

El acero recuperado es de muy alta calidad por lo que es solicitado por la industria siderúrgica como materia prima para la fabricación de acero (Figura 4).

Fibra Textil

La fibra textil, presente especialmente en los neumáticos de turismo, supone todo un reto para el proceso de reciclado (Figura 4). Es necesario extraerla de manera adecuada puesto que puede suponer un problema en el entorno de trabajo por su ligereza y pequeño tamaño (limpieza, salud, incendios). Se requieren sistemas adecuados de aspiración con el fin de reducir al máximo su impacto. Actualmente, debido a su alto poder calorífico se utiliza como combustible sólido recuperado en la industria cementera.

Caucho

Como se indicó en la Tabla 1, un neumático puede contener más de un tipo de caucho y diversos aditivos, incluso entre sus diferentes partes (carcasa, banda de rodadura,...). Esta compleja composición implica que separar y descomponer cada uno de los compuestos sea una tarea muy complicada si no imposible. Sin embargo, este material presenta propiedades homogéneas cuando se toma una muestra adecuada. Por lo tanto, el caucho de NfVU se recicla en su totalidad como triturado, granulado o polvo (Figura 5). Cada una de las diferentes etapas de transformación de los NfVU junto con diversas configuraciones del equipamiento utilizado permiten obtener productos finales de diferentes tamaños que se utilizan en diversas aplicaciones.

Gracias a sus excelentes propiedades mecánicas (elasticidad, absorción de vibraciones, agarre, resistencia a la abrasión) y su elevada durabilidad (termoestable), los NfVU son recursos materiales de gran valor. Así, la utilización de caucho procedente de NfVU, además de por su bajo coste y su bajo impacto medioambiental, permite una mejora de determinadas propiedades frente a otros materiales convencionales: mejora de las



Figura 4. Acero y fibra textil separados durante el proceso de transformación.



Figura 5. Diferentes granulometrías del caucho procedente de los NFVU.

propiedades mecánicas gracias a sus propiedades visco-elásticas (mayor tensión y alargamiento a rotura, resistencia al desgarro y la abrasión, resistencia a la fisuración y el agrietamiento), elevada durabilidad y resistencia a las condiciones climáticas (rayos UV, ozono, cambios de temperatura y humedad), absorción de impactos, atenuación de ruido y vibraciones, aislante térmico y eléctrico, etc.

Desarrollo de mercados y aplicaciones

Durante los últimos años, empresas de diferentes sectores, así como centros tecnológicos y universidades han mostrado gran interés por llevar a cabo proyectos de I+D para el desarrollo de nuevos mercados de los materiales procedentes de los NFVU. Desde SIGNUS se han impulsado diferentes proyectos para dar valor a estos materiales, entre ellos,

el desarrollo de piezas de granulado de caucho y resina mediante sistemas de fabricación en continuo, la aplicación de la nanotecnología a las partículas de caucho, incorporación de partículas de caucho en el hormigón de barreras New Jersey (seguridad en carreteras), o el desarrollo de superficies de altas prestaciones con caucho para pistas ecuestres. La búsqueda de nuevas aplicaciones del NFVU continúa siendo la principal apuesta de SIGNUS en su contribución a la sostenibilidad y a la economía circular.

Actualmente existe un mercado perfectamente estructurado y además, existen especificaciones y requisitos técnicos que se aplican a los productos según sus usos. Los principales nichos de mercado del caucho de NFVU en España son: (i) rellenos para campos de césped artificial [9], (ii) suelos de seguridad en parques infantiles, (iii) como modificador de

mezclas bituminosas y (iv) para la fabricación de piezas moldeadas. En la **Figura 6**, se presenta un gráfico con las cifras de suministro a cada una de las aplicaciones en toneladas por año durante el periodo 2009-2016 [10], por parte de los granuladores que forman parte de la red operacional de SIGNUS:

En primer lugar, se observa que la utilización del granulado de NFVU como relleno de césped artificial en campos de fútbol está suficientemente consolidado, siendo además, el que más volumen de material demanda. Lo mismo se concluye de la aplicación en suelos de seguridad de parques infantiles donde el granulado de caucho procedente de NFVU es el material más rentable y con mejores propiedades técnicas para esta aplicación. En el caso de las mezclas bituminosas, el consumo ha ido disminuyendo en los últimos años, llegando a valores que están muy por debajo del

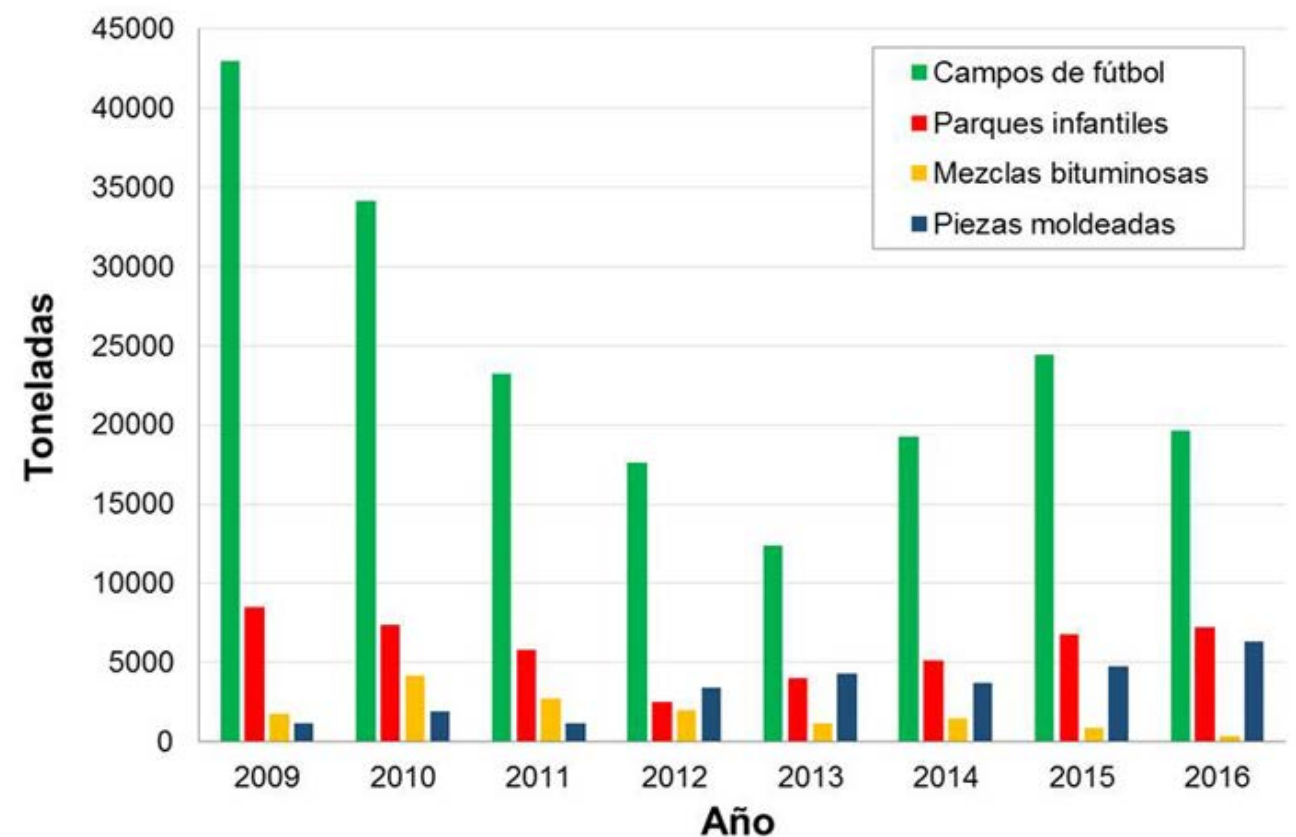


Figura 6. Destinos del caucho de NFVU en toneladas por año [10].

Tabla 2. Principales aplicaciones del polvo de NFVU.

POLVO < 0,8 mm
Mezclas Bituminosas
Mantas para aislamiento térmico y acústico (edificación)
Piezas de caucho
Suelas para calzado
Piezas de la industria auxiliar del automóvil: alfombrillas, latiguillos, superficies de aislamientos, etc.
Neumáticos macizos para carretillas, contenedores, etc.
Mezclas con SBR o con monómeros de plástico, para piezas de seguridad vial, recubrimientos, etc.
Fabricación de caucho regenerado

verdadero potencial que tiene esta aplicación. Finalmente, se puede apreciar que existe un progresivo ascenso del mercado de piezas moldeadas. Además, existen otras aplicaciones minoritarias como aislamiento térmico y acústico, suelas de calzado, losetas, etc. (ver **Tablas 2 y 3**), de las cuales no se dispone de datos desagregados.

En la **Figura 7**, se presenta el reparto de material en las diversas aplicaciones del polvo y granulado de caucho, en toneladas, durante el periodo comprendido entre los años 2009 y 2016. Las cifras confirman la creciente consolidación del caucho procedente de NFVU como recurso demandado por el mercado.

Cada una de las diferentes etapas de transformación del NFVU permite obtener productos finales de diferentes tamaños que se emplean en diferentes aplicaciones (**Tablas 2 y 3** y **Figura 8**).

Perspectivas y retos

El desarrollo de nuevos nichos de mercado donde se aprovechen todas las propiedades

de mejora que aporta el uso de materiales procedentes de los NFVU está fuertemente condicionado por (i) la desacertada idea de que los productos fabricados con materiales reciclados son de peor calidad y (ii) la dificultad de entrada en ciertos sectores muy conservadores. Por ello, con el fin de desarrollar nuevos mercados se requieren grandes esfuerzos en tareas de I+D, así como analizar la viabilidad tanto técnica como económica de las nuevas aplicaciones y demostrar la existencia en una mejora del comportamiento del producto final derivado de la utilización del NFVU, frente a los materiales convencionales que se estén utilizando en cada caso.

Uno de los grandes retos es la idea de reciclado "neumático a neumático", donde los materiales procedentes de los NFVU volverían a incorporarse al proceso de fabricación de neumáticos nuevos. Sin embargo, existen muchos factores que podrían comprometer el producto final y que es imposible controlar en las circunstancias actuales: trazabilidad total del material, calidad, tipo (camión, turismo,...), rendimiento de productos finales, etc.

Tabla 3. Principales aplicaciones del granulado de NFVU.

GRANULADO 0,8 -20 mm
Rellenos de césped artificial
Superficies deportivas (atletismo, tenis, multideporte...)
Pistas ecuestres
Pavimentos de seguridad (capa superficial)
Base elástica superficies deportivas y pavimentos seguridad
Alcorques
Corteza decorativa (jardinería)
Sistemas de absorción de vibraciones (vías férreas)
Barreras de seguridad en carretera (barreras New Jersey)
Piezas de caucho para sistemas de protección de motoristas
Losetas para pavimentos de seguridad
Mantas para aislamiento térmico y acústico (edificación)
Fabricación de polvo de caucho micronizado

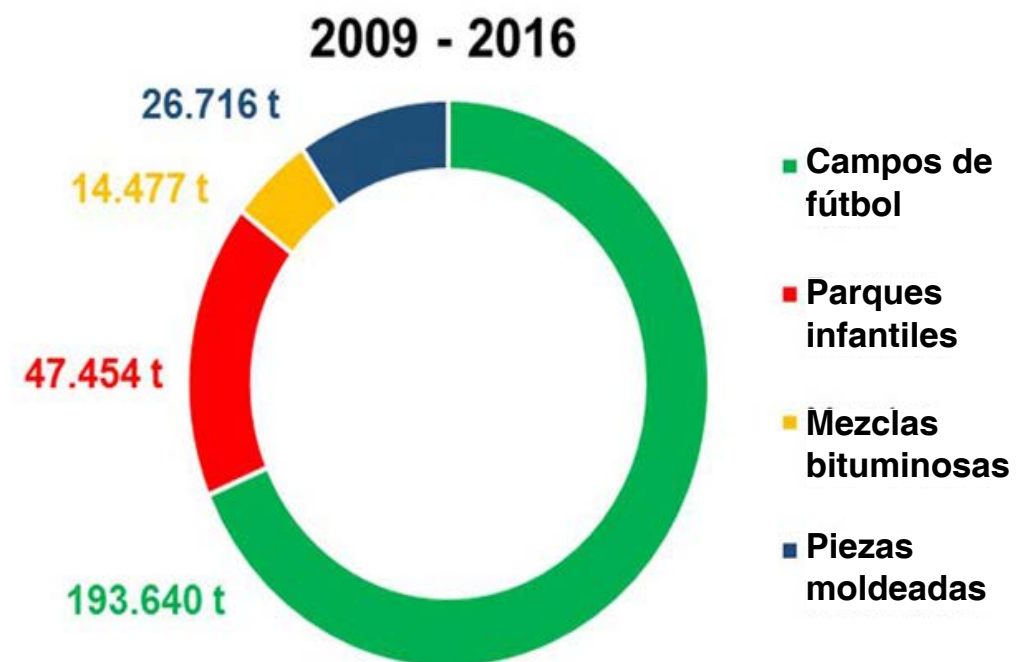


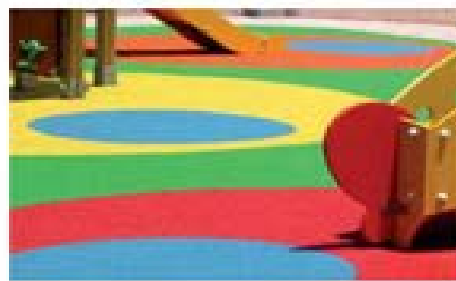
Figura 7. Distribución de destinos de mercado del caucho de NFVU (España 2009-2016) [10].



Relleno de Césped artificial



Capa elástica superficies deportivas



Pavimentos de seguridad parques infantiles



Betunes modificados – Mezclas bituminosas



Superficies deportivas



Pistas ecuestres



Carril embebido



Bloque aislado para vía en placa



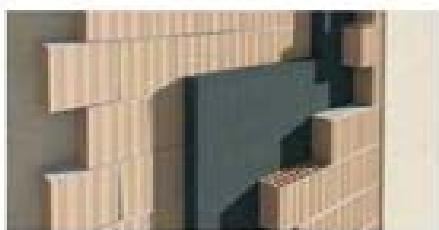
Barreras de seguridad en carretera



Sistemas de protección de motoristas



Alcorques



Aislantes en edificación



Suelas de calzado



Ruedas macizas

Figura 8.
Algunas aplicaciones de polvo y granulado procedentes de NFVU.

En este afán de potenciar el uso de materiales procedentes de los NFVU, existen empresas y centros de investigación que centran sus esfuerzos en nuevos procesos de tratamiento y reutilización. Como por ejemplo, procesos de desvulcanización de caucho cuyos productos resultantes son material caucho desvulcanizado y plastificantes/aditivos a base de aceites. En esta misma línea existe la valorización de los NFVU mediante pirólisis y/o descomposición de caucho con el fin de obtener gases de síntesis (nuevos productos), aceites (combustible) y negro de carbono. Sin embargo, hasta ahora, tanto las tecnologías empleadas como los productos finales no cumplen con las expectativas en cuanto a rentabilidad y/o nivel de calidad. Tal es el caso del negro de carbono recuperado que no cumple las mismas especificaciones que el utilizado en la fabricación del neumático, por lo que serían necesarios procesos de refinamiento adicionales que no garantizarían su viabilidad económica. En cualquier caso, siempre sería posible identificar nuevas aplicaciones para este tipo de materiales que permitirían abrir nuevas líneas de investigación.

Otra de las recientes tecnologías en auge es la del polvo de caucho micronizado. Novedosas técnicas patentadas de molienda mecánica a baja temperatura (criogénica) permiten conseguir partículas de hasta varias decenas de micras con un alto potencial de aplicación en extrusión y moldeo de productos, además de en neumáticos nuevos. Cabe destacar que los grandes fabricantes de neumáticos están orientando sus nuevas estrategias en este tipo de productos lo cual garantizará nuevas perspectivas en la aplicación de materiales procedentes de los NFVU.

Una de las aplicaciones más destacable es la utilización de polvo de caucho en mezclas bituminosas. Durante las últimas décadas, ha quedado patente que esta tecnología permite un aumento de la vida en servicio del pavimento con un menor mantenimiento y, en algunos casos, también supone una reducción del espesor de la capa. Esto supone significativos ahorros de materias primas, ahorros de energía durante la producción, transporte y extendido. Actualmente, se siguen haciendo

esfuerzos en mejorar las técnicas de fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas modificadas con polvo de caucho [11].

Otro de los grandes retos a los que se está enfrentando el sector del reciclado de neumáticos es el desarrollo de normativa específica para poder caracterizar los materiales procedentes de los NFVU. Durante los últimos años, se han desarrollado diferentes normas europeas dentro del Comité Técnico 366 y nacionales, que permiten responder mejor a las necesidades de la industria (caracterización de los materiales, propiedades físicas y químicas, criterios de selección de neumáticos enteros para valorización,...). Un paso necesario a futuro es el desarrollo de especificaciones de estos materiales en base a una normativa para lograr un mayor reconocimiento y aceptación en el mercado.

Las nuevas directrices económicas basadas en el plan de economía circular (UE 2015) tendrán a corto plazo un impacto positivo en la valorización de los materiales procedentes de los NFVU. En particular, será de gran ayuda la aprobación de la certificación de fin de la condición de residuo para los materiales procedentes de los NFVU, lo cual permitirá transformar de manera definitiva un residuo en una materia prima secundaria.

Bibliografía

- [1] 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" (02/12/15). Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614>
- [2] Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Ministerio de Economía, Industria y Competitividad: "Pacto por la Economía Circular". Disponible en: www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/pacto/
- [3] European Tyre & Rubber manufacturers' association (ETRMA), "End-of-life Tyre Report 2015", Bruselas (2015).
- [4] BOE núm. 2, 3 enero 2006, Real Decreto 1619/2005 de 30 de diciembre de 2005.
- [5] SIGNUS Ecovalor S.L, www.signus.es.
- [6] SIGNUS Ecovalor S.L., "Memoria Anual 2016". Madrid (2016).
- [7] European Tyre & Rubber manufacturers' association (ETRMA), "BLIC Life Cycle Assessment of an average European car tyre" (2001).
- [8] European Tyre & Rubber manufacturers' association (ETRMA), "Communication from tyre manufacturers of truck tyres UNEP Technical guidelines for the environmentally sound management of used tyres" (2011).
- [9] Consejo Superior de Deportes, Seguridad y Mantenimiento de los Campos de Fútbol de Césped Artificial, *Catálogo General de Publicaciones Oficiales* (2012).
- [10] SIGNUS Ecovalor S.L., Datos suministrados por las plantas contratadas para los servicios de valorización material durante el periodo 2009-2016.
- [11] SIGNUS Ecovalor S.L., "Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático" (2014) y "Guía para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumático" (2017). Disponibles en: www.signus.es/publicaciones.