

ALTERNATIVAS PARA LA GESTIÓN DEL RESIDUO DE FRAGMENTACIÓN DEL AUTOMÓVIL

Carlos Muñoz

Enrique Moliner

Daniel Garraín

Vicente Franco

Rosario Vidal

*Grupo de Ingeniería del Diseño, Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción.
Universitat Jaume I, Castellón (España)*

Daniel Justel

*Departamento de Mecánica y Producción Industrial, Escuela Politécnica Superior de
Mondragón (EPS), Mondragón Unibertsitatea, Arrasate (España)*

Abstract

The shredder residue is a complex heterogeneous mixture to consist of mixtures of materials. The fractions or materials of shredder residue are very difficult to process and to sort. For its own makeup, the shredder residue shows incompatibilities for apply an optimal treatment. For instance: the moisture, the wood, the metals and heavy metals, the glass, the sand, the powertrain fluids, the plastics and polymers, the foams and rubbers, the textiles and fibers, the printed board cards and flame retardants or other contained substances. Because of her properties and the previous treatment applied for its constitution, their composition and physical properties are too heterogeneous and variable. In addition, the existing pollutants –chlorine, heavy metals, dioxins and furans–, the moisture, the account of ash o her heating value, mean another difficult for select the correct treatment. This is the fact that brings about the development of several and different treatment technologies.

In this paper we show, assessment and compare current and emerging technologies for treatment of automotive shredder residue.

Keywords: *shredder residue; waste management; automotive*

Resumen

El residuo de fragmentación es una mezcla heterogénea compleja formada por mezclas de materiales, difícil de tratar y separar en las distintas fracciones o materiales que lo componen. Por su propia naturaleza, sus constituyentes presentan incompatibilidades para su tratamiento. Este sería el caso de la humedad, la madera, los metales, el vidrio, la arena, los fluidos automotrices, los plásticos, las espumas, las gomas y elastómeros, los tejidos y fibras, cantidades variables de metales pesados, tarjetas de circuitos impresos, retardantes de fuego y otros residuos. Debido a su origen y a los tratamientos previos que lo han generado, su composición exacta y propiedades físicas y químicas son también heterogéneas y variables. Además, la presencia de contaminantes –cloro, metales pesados, dioxinas y furanos–, el grado de humedad, la cantidad de cenizas o su poder calorífico, suponen una dificultad añadida para su tratamiento. Esta situación ha motivado el desarrollo de diversas y variadas tecnologías de tratamiento.

En este estudio se exponen, analizan y comparan las tecnologías existentes y emergentes que, a nivel mundial, tratan de mejorar el tratamiento del residuo de fragmentación, particularizado para el sector del automóvil.

Palabras clave: *residuo de fragmentación; gestión de residuos; automóvil*

1. Introducción

Las plantas fragmentadoras son instalaciones de tratamiento donde se procesan una gran variedad de materiales de desecho (vehículos desguazados, residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, chatarras mixtas, etc.), con el fin de recuperar los materiales metálicos. Tras las operaciones de fragmentación y separación, se obtiene: por un lado, una fracción de materiales metálicos que se destina a la industria siderúrgica y, por otro lado, un residuo de fragmentación compuesto por una mezcla de diversos materiales (Tabla 1), que habitualmente se destina a vertedero.

Actualmente, cerca del 20% de la masa de los vehículos al final de su vida útil (VFUs) generados en Europa acaba formando parte del residuo de fragmentación (Eurostat, 2011). Entre el 20% y el 50% de la masa del residuo de fragmentación procede del tratamiento de VFUs (GHK & Bio Intelligence Service, 2006). Otro de los orígenes más comunes del residuo de fragmentación son los electrodomésticos desechados. Por lo tanto, el residuo de fragmentación procede principalmente del tratamiento de residuos de productos complejos, por lo que su composición es muy heterogénea. Dependiendo del origen y de los tratamientos donde se genera tal residuo, pueden aparecer diferencias significativas en su composición. Por ejemplo, cuando prevalece la procedencia de electrodomésticos de línea blanca se observa mayor presencia de cobre y policlorobifenilos (PCBs) (GHK & Bio Intelligence Service, 2006). La variabilidad temporal y geográfica de su composición material se pone de manifiesto en la Tabla 1, donde se comparan las composiciones proporcionadas por distintos estudios. La complejidad y variabilidad de la composición material del residuo de fragmentación repercute directamente en su composición química y en sus propiedades físico-químicas, que también son heterogéneas y variables (Zevenhoven & Saeed, 2002).

La complejidad de la composición material del residuo de fragmentación dificulta su tratamiento y separación en las distintas fracciones de materiales que lo componen. Algunos de sus constituyentes presentan incompatibilidades a la hora de aplicar un tratamiento conjunto. Tales incompatibilidades vienen dadas por la presencia de humedad, madera, metales, vidrio, plásticos, espumas, elastómeros, tejidos, fibras, arena, cantidades variables de metales pesados, fluidos automotrices, tarjetas de circuitos impresos, retardantes de fuego y otros residuos (Jody & Daniels, 2006). A estos inconvenientes se suma la presencia de contaminantes (cloro, metales pesados, PCBs, dioxinas y furanos, etc.), que en determinadas concentraciones hacen que el residuo adquiera la consideración de peligroso, limitando sus posibilidades de tratamiento o requiriendo la aplicación de tratamientos adicionales. Por ejemplo, la presencia de cloro puede limitar el tratamiento térmico del residuo de fragmentación, pues produce dioxinas, furanos y ácido clorhídrico e incrementa la volatilidad de los metales pesados, agravándose este último efecto cuando existe cobre en cantidades elevadas (Zevenhoven & Saeed, 2002; Murray & Price, 2008; Vermeulen et al., 2011). Asimismo, la presencia de PCBs puede impedir el uso del residuo como combustible de sustitución (Boughton & Horvath, 2006), mientras que concentraciones altas de metales pesados con granulometrías muy finas aumentan el riesgo de contaminación por lixiviados cuando se deposita el residuo de fragmentación en vertederos (Vermeulen et al., 2011).

La variabilidad de la composición material y química del residuo de fragmentación, así como de sus propiedades físico-químicas, hace que resulte complicado seleccionar un tratamiento óptimo. La presencia de contaminantes, el grado de humedad, la cantidad de cenizas y el

poder calorífico (entre 70y 26 MJ/kg) del residuo son determinantes a la hora de seleccionar un tratamiento; sin embargo, estos parámetros pueden variar significativamente dependiendo del origen del residuo de fragmentación y de los tratamientos previos aplicados (Zevenhoven & Saeed, 2002; Vermeulen et ál., 2011).

Tabla 1: Composición material del residuo de fragmentación (Zevenhoven & Saeed, 2002)

% en peso	Keller, 2003	Glavagno et ál., 2001	Das et ál., 1995	Mirabile et ál., 2002	Lanoir et ál., 1997	Ambrose et ál., 2002
Plásticos	30,0-48,0	20,0	21,5	41,0		33,0
Plásticos (espumas)						15,0
Plásticos (incl. recubrimientos, textil)					83,1	
Elastómeros (incl. goma)	10,0-32,0	20,0	5,3	21,0	2,6	18,0
Fibras (textil, madera, papel)	4,0-26,0	25,0	53,7	10,0		10,0
Pinturas, lacas	3,0-10,0			5,0		
Metales	20,0		8,1		13,5	3,0
Vidrio, cerámica, material eléctrico	3,0-16,0		3,5	19,0		
Polvo, tierra, etc.	10,0-20,0		excl.			
Inertes (vidrio, arenas, grava y otros)		35,0				
Otros (residuos)			7,9	4,0	0,6	21,0
Aceites, agua	15,0-17,0					

Por lo tanto, la complejidad y heterogeneidad del residuo de fragmentación, unido a la variabilidad que presenta en cuanto a composición y propiedades, han supuesto un gran obstáculo –a nivel técnico y económico– para su valorización. En consecuencia, su destino más habitual ha sido la eliminación en vertedero. En el caso de los VFUs, la tasa media europea de reutilización y valorización para el año 2008 fue del 87,3%, mientras que para España fue del 85,7% (Eurostat, 2011). Esto significa que el 12,7% de la masa de los vehículos europeos acabó depositada en vertederos, correspondiendo la práctica totalidad de dicha masa a residuo de fragmentación. Según la Directiva 2000/53/CE, relativa a los vehículos al final de su vida útil, la tasa de reutilización y valorización para el año 2015 deberá alcanzar un valor mínimo del 95%. Para cumplir ese objetivo, es necesario cambiar el modelo de gestión del residuo de fragmentación, implementando tratamientos de post-fragmentación –en sustitución del depósito en vertedero– que sean capaces de recuperar una parte importante del residuo, ya sea mediante su valorización material y/o energética.

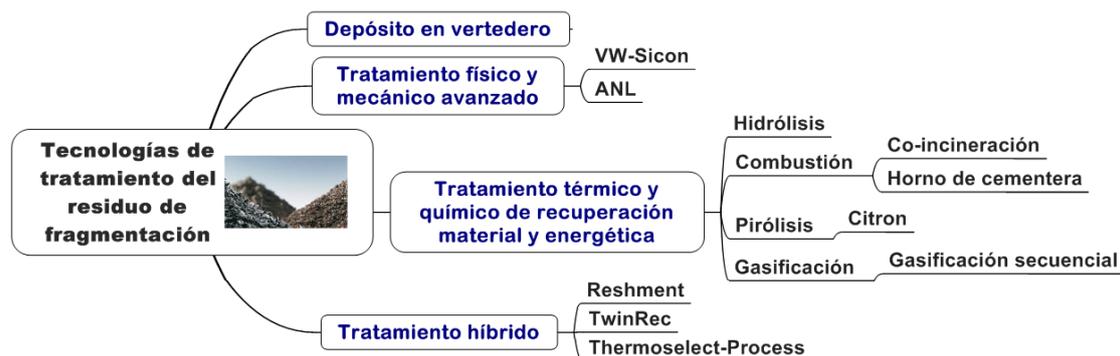
2. Objetivos y metodología

La finalidad de este trabajo es identificar posibles tecnologías de tratamiento para el residuo de fragmentación derivado del fin de vida de los vehículos. Este trabajo se enmarca dentro de un estudio de mayor alcance que tiene por objeto la evaluación de impacto ambiental del sistema de tratamiento de VFUs, haciendo uso de la metodología del Análisis del Ciclo de Vida. En este contexto, el presente trabajo se limita a la elaboración de un estado del arte de las alternativas disponibles para el tratamiento del residuo de fragmentación, incluyendo tecnologías ya desarrolladas a nivel industrial así como tecnologías emergentes y en fase experimental. De este modo, se pretende identificar aquellas tecnologías de tratamiento más adecuadas, las cuales se someterán en el futuro a una caracterización y evaluación detallada, con vistas a determinar tanto su impacto ambiental como su contribución al cumplimiento del objetivo de valorización exigido por la Directiva 2000/53/CE.

3. Tecnologías para el tratamiento del residuo de fragmentación

Existen estudios que analizan y comparan distintas tecnologías para el tratamiento del residuo de fragmentación bajo diferentes enfoques: potencial de reutilización y valorización, implicaciones económicas, impacto ambiental, impacto sobre la salud humana, etc. (Zevenhoven & Saeed, 2002; GHK & Bio Intelligence Service, 2006; Boughton & Horvath, 2006; Moakley, Weller & Zelic, 2010; Ciacci et ál., 2010; Vermeulen et ál., 2011). Las tecnologías de tratamiento analizadas en estos estudios se pueden clasificar en cuatro grandes grupos (Figura 1): depósito en vertedero, tratamiento físico y mecánico avanzado, tratamiento térmico y químico de recuperación material y energética y tratamiento híbrido.

Figura 1: Tecnologías para el tratamiento del residuo de fragmentación



3.1. Depósito en vertedero

La eliminación en vertedero es la modalidad de tratamiento menos preferible, según el principio de jerarquía por el que se rige la gestión de residuos; sin embargo, ésta sigue siendo la opción más común para el residuo de fragmentación en la mayoría de países europeos (Eurostat, 2011). Además, la Directiva 2000/53/CE fija la tasa de reutilización y valorización de VFUs para el año 2015 en un valor mínimo del 95%. Por lo tanto, la eliminación en vertedero continuará siendo una alternativa válida para un máximo del 5% de la masa del vehículo.

El residuo de fragmentación es una mezcla heterogénea de diversos materiales que suele catalogarse como residuo peligroso, debido a la presencia de sustancias contaminantes (cloro, metales pesados, compuestos orgánicos clorados, dioxinas y furanos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, etc.). Aún así, este residuo normalmente comparte vertedero con residuos sólidos urbanos, residuos del tratamiento de aguas, residuos inertes y otros similares (Doka, 2009). Al igual que el resto de residuos, genera lixiviados con presencia de contaminantes, que deben mantenerse por debajo de los límites establecidos para su depósito en vertedero. Sin embargo, a diferencia de otros residuos con los que comparte vertedero, el residuo de fragmentación apenas contribuye a la formación de biogás en vertedero, aun considerando la posible degradación de su fracción polimérica (Boughton & Horvath, 2006; Ciacci et ál., 2010). En cualquier caso, el problema más grave de destinar el residuo de fragmentación directamente a vertedero es que aumenta la necesidad de crear vertederos y de intensificar la extracción de materias primas (al no aprovechar los recursos contenidos en el residuo).

El depósito en vertedero es una modalidad de tratamiento muy extendida y accesible, puesto que existen 465 instalaciones autorizadas distribuidas por toda la Unión Europea (UE) (European Environment Agency, 2009), con una capacidad media de almacenamiento de 118.000 metros cúbicos por instalación (Doka, 2009).

3.2. Tratamientos físicos y mecánicos avanzados

Las tecnologías de tratamiento físico-mecánico avanzado combinan varios de los procesos tradicionales de separación y, en ocasiones, procesos de separación basados en la diferencia de densidad entre materiales. Existen varias tecnologías de tratamiento de este tipo, aunque hay dos que destacan por encima del resto: VW-Sicon y ANL.

VW-Sicon

La tecnología VW-Sicon –desarrollada por Volkswagen AG y Sicon GmbH– combina varios procesos de separación y clasificación, con la finalidad de extraer del residuo de fragmentación aquellos materiales que tienen salida en el mercado como sustitutos de diversas materias primas. Esta tecnología permite extraer metales férricos, metales no férricos, una mezcla de fibras textiles y espumas, una mezcla de minerales y dos fracciones distintas de plásticos granulados (Jody & Daniels, 2006; Nemry et ál., 2008). Los metales férricos y no férricos se destinan a la industria metalúrgica para su reciclado. La mezcla de fibras textiles y espumas suele depositarse en vertedero, aunque también puede emplearse para sustituir al polvo de carbón en el secado de lodos de depuradora. La fracción mineral (compuesta de vidrio, partículas finas de hierro, óxido, alambres de cobre y polvo) puede depositarse en vertedero o bien utilizarse como material de relleno en asfaltos, hormigones y otros materiales compuestos. Una de las fracciones de plásticos presenta bajo contenido en cloro y en metales, de modo que puede utilizarse como agente reductor en altos hornos en sustitución de aceites pesados; otra posibilidad es su separación en varias fracciones de plásticos (PE, PP y EPDM) con salida en el mercado de materiales reciclados. La otra fracción de plásticos está compuesta básicamente por PVC, de modo que puede usarse para producir PVC reciclado. Moakley, Weller y Zelic (2010) estiman que esta tecnología permitiría alcanzar una tasa máxima de recuperación del 97% de la masa del VFU.

Actualmente, existen tres plantas industriales en funcionamiento –dos en Austria y otra en Francia– que suman una capacidad de tratamiento de 200.000 t/año de residuo.

ANL

El Argonne National Laboratory (ANL) desarrolló una tecnología que combina procesos físico-mecánicos y procesos de separación basados en la diferencia de densidad entre materiales, con la finalidad de separar y concentrar materiales específicos del residuo de fragmentación para facilitar su valorización. Estos últimos procesos permiten recuperar hasta un 90% de los plásticos presentes en el residuo de fragmentación, con un grado de pureza del 95%. Mediante los procesos de separación físico-mecánica se obtienen las siguientes fracciones: metales férricos; metales no férricos; espumas; piedras; finos; mezclas de textiles, fibras y plásticos; polvo y otros residuos ligeros; y un concentrado de plásticos. Los metales férricos y no férricos se destinan a la industria metalúrgica para su reciclado. Las espumas están compuestas en un 90% de PUR, que es susceptible de reciclado, y en un 10% de fibras de PET, que se envían a vertedero. Las piedras, las mezclas de finos, el polvo y el resto de residuos ligeros sin valor comercial también se envían a vertedero. Las mezclas ligeras de fibras, textiles y plásticos pueden valorizarse energéticamente. El concentrado de plásticos se somete al tratamiento adicional de separación por flotación, mediante el cual se separan las siguientes fracciones: mezclas de PP y PE; mezclas de madera y caucho; mezclas de HIPS y ABS; mezclas de ABS y PC; mezclas de plásticos sin caracterizar; y algunos materiales específicos como ABS, caucho y metales (acero, aluminio y cobre). Los metales se destinan a la industria metalúrgica para su reciclado. La mezcla de madera y caucho, así como las mezclas de plásticos sin caracterizar, pueden valorizarse energéticamente. El resto de materiales y mezclas de materiales presentan una elevada pureza, de modo que pueden utilizarse como materia prima para la producción de PP, PS, ABS, ABS/PC y EPDM. Moakley, Weller y Zelic (2010)

estiman que esta tecnología permitiría alcanzar una tasa máxima de recuperación del 94% de la masa del VFU.

Actualmente, existe una planta piloto en el propio ANL –situada en Estados Unidos– que tiene una capacidad máxima de tratamiento de 18 t/h de residuo (Gallon & Binder, 2006).

3.3. Tratamientos térmicos y químicos de recuperación material y energética

Las tecnologías de tratamiento térmico y químico son el grupo más amplio de tecnologías. Puede dividirse en cuatro subgrupos: hidrólisis, combustión, pirólisis y gasificación.

Hidrólisis

La hidrólisis es una reacción química entre una molécula de agua y otra molécula, en la que la primera se divide y sus átomos pasan a formar parte de otra especie química. Bajo este principio se han desarrollado diversos sistemas que –utilizando agua como disolvente– convierten un material orgánico en un fluido combustible. Esta técnica se puede aplicar para obtener combustible líquido a partir de diversos tipos de residuos que contienen carbono (residuos de biomasa, residuos sólidos urbanos, neumáticos fuera de uso, etc.), utilizando agua, energía calorífica y presión (Changing World Technologies Inc., 2011). Su aplicación al residuo de fragmentación permite obtener gasóleo ligero y una mezcla de gases hidrocarburos. La mezcla de gases hidrocarburos se usa como combustible en el propio proceso de hidrólisis para generar vapor de agua. El gasóleo ligero constituye el producto principal del proceso y puede emplearse como combustible de sustitución o como materia prima en la industria química (Boughton & Horvath, 2006).

No se tiene conocimiento de plantas industriales que apliquen de manera habitual la tecnología de hidrólisis para el tratamiento de residuos de fragmentación del automóvil. Sin embargo, se han realizado algunas pruebas industriales donde se aplicaron tratamientos de hidrólisis sobre residuos de fragmentación en instalaciones concebidas para el tratamiento de otros residuos, pero que fueron adaptadas para la realización de tales experimentos.

Combustión

La combustión es una reacción química de oxidación en la que se desprende una gran cantidad de energía en forma de luz y calor. En toda combustión existe un agente combustible, que libera gran cantidad de energía cuando se oxida de forma violenta, y otro agente comburente, que oxida al combustible. Este principio químico básico se aplica para la destrucción de residuos en hornos de combustión, donde se produce la reacción de oxidación en exceso de oxígeno, que se conoce comúnmente como incineración. La ventaja de este tratamiento es que permite reducir el volumen de los residuos a la vez que se aprovecha su contenido energético. Sin embargo, este tratamiento tiene el inconveniente de que genera emisiones tóxicas (hidrocarburos aromáticos policíclicos, dioxinas y furanos), que deben depurarse antes de su liberación a la atmósfera. Generalmente, el residuo de fragmentación no es apto para su incineración en solitario, sino que debe mezclarse con otros residuos de menor poder calorífico, como son los residuos sólidos urbanos (Zevenhoven & Saeed, 2002; Vermeulen et ál., 2011). Otra aplicación potencial, que también tiene su base en la combustión, es su utilización como suplemento energético y material en la producción de cemento (SIGRAUTO, 2001; Boughton & Horvath, 2006; Murray & Price, 2008; Vermeulen et ál., 2011).

Co-incineración con residuos sólidos urbanos

La incineración de residuos sólidos urbanos (RSU) es una tecnología extendida. Esta misma tecnología es aplicable para la incineración conjunta del residuo de fragmentación y de RSU, aunque con ciertos condicionantes. Entre ellos, destaca la necesidad de limitar la aportación

de residuo de fragmentación, puesto que está relacionada con el aumento de las emisiones de ciertos contaminantes, mientras que para aportaciones en torno al 40% se observan problemas operativos en las plantas (Zevenhoven & Saeed, 2002; Vermeulen et ál., 2011). Este tratamiento logra reducir la masa de residuo a un 25% de la masa inicial (Doka, 2009).

La incineración de residuos es una modalidad de tratamiento muy extendida y accesible. Existen 365 instalaciones autorizadas distribuidas por la UE (European Environment Agency, 2009), con una capacidad media de incineración de 110.000 t/año de residuo por instalación (Doka, 2009). En principio, cualquiera de estas instalaciones podría co-incinerar el residuo de fragmentación.

Horno de cementera

Entre las diferentes tecnologías para la producción de cemento portland, la fabricación por vía seca es la más extendida. En este proceso cabe la posibilidad de emplear residuo de fragmentación para la obtención del clínker. El residuo de fragmentación puede sustituir a una parte del combustible y a una parte del crudo, puesto que cerca del 50% de la masa del residuo es combustible, y está compuesto en un 40% de silicatos, calcio, aluminio y hierro. La aportación de residuo de fragmentación se determina en función de la composición del cemento deseada y de las necesidades energéticas del proceso en cuestión. No obstante, la aportación de residuo de fragmentación tiene limitaciones, ya que aportaciones demasiado elevadas –en torno a un 40% de la masa de crudo– pueden ocasionar problemas operativos en la zona de inyección del combustible e incrementos de las emisiones de sustancias peligrosas (Vermeulen et ál., 2011). En cambio, si la aportación de residuo de fragmentación es menor y se limita su contenido de cloro y de metales muy volátiles, aplicando un tratamiento previo sobre el residuo, no se producen variaciones significativas en la generación de emisiones y de residuo sólidos (SIGRAUTO, 2001; Boughton & Horvath, 2006).

En el conjunto de la UE existen 188 plantas dedicadas a la obtención de clínker para producción de cemento (European Environment Agency, 2009), con una producción conjunta entre 1.600 y 4.000 t/día de clínker. En las últimas décadas, muchas de estas instalaciones han empezado a usar combustibles alternativos similares al residuo de fragmentación procedente de los VFUs, como es el caso de los neumáticos fuera de uso (SIGRAUTO, 2001).

Pirólisis

La pirólisis es la descomposición termoquímica de materia orgánica a elevada temperatura y en ausencia de oxígeno. Se trata de una tecnología ampliamente extendida para la obtención de combustibles y productos químicos (líquidos y gaseosos) a partir de materiales orgánicos como madera, carbón, plásticos, neumáticos y diversos tipos de residuos (Jody & Daniels, 2006). Los productos derivados de la pirólisis, así como su cantidad y calidad, dependen de la composición de la materia prima aportada al proceso y de la temperatura, presión y tiempo de residencia en el reactor. La pirólisis del residuo de fragmentación produce combustible líquido y gaseoso, ciertas cantidades de carbón y de residuos sólidos.

La tecnología Citron consiste en el tratamiento de mezclas de residuos, entre los que se incluye el residuo de fragmentación, mediante un proceso de pirólisis en un horno de combustión rotativo. Esta tecnología transforma residuos de diversa procedencia (que contienen metales pesados y fracciones orgánicas) en carbón y energía, siendo esta última aprovechada en el propio proceso de tratamiento. La tecnología Citron permite extraer varios materiales con diversas posibilidades de aprovechamiento. La chatarra metálica se destina a la industria metalúrgica para su reciclado. El concentrado de cinc se emplea en procesos de galvanización y en la fabricación de latón. El concentrado de calcio y el

concentrado de hierro se usan como aditivos para la corrección de composiciones en la industria cementera. El concentrado de aluminio y el concentrado de sílice pueden utilizarse como materia prima en la industria siderúrgica, en la industria cementera o como material de relleno para carreteras, asfaltos, hormigones y otros productos similares; el mercurio (99,99% de pureza) se emplea en la industria química; y el resto de residuos generados en el proceso, que no son susceptibles de aprovechamiento, se depositan en vertedero (Zevenhoven & Saeed, 2002; Jody & Daniels, 2006).

Actualmente, esta tecnología se encuentra implantada en Citron SA, que es una planta industrial –situada en Francia– con una capacidad de 80.000 t/año de residuo (Citron, 2010).

Gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico en el que el carbono presente en un material o residuo se transforma en un gas combustible mediante una serie de reacciones en presencia de un agente gasificante. Como agente gasificante puede usarse aire, oxígeno, vapor de agua o hidrógeno. La composición del gas obtenido depende principalmente de las condiciones de gasificación, siendo habitual que contenga altas cantidades de monóxido de carbono y/o hidrógeno, con contenidos menores de dióxido de carbono, metano y otros hidrocarburos. El poder calorífico del gas combustible depende del sustrato carbonoso de origen y del agente gasificante empleado. Este gas puede usarse para generar calor, vapor o electricidad.

La tecnología de gasificación secuencial para el residuo de fragmentación sólo se ha aplicado de forma experimental en una planta industrial de gasificación de neumáticos fuera de uso (Mancini, Tamma, & Viotti, 2010). Aparte de los mencionados experimentos, no se han identificado otras instalaciones de gasificación secuencial que traten residuos de fragmentación derivados del fin de vida de vehículos a nivel industrial.

3.4. Tratamientos híbridos

Las tecnologías de tratamiento híbrido combinan varias de los tratamientos expuestos previamente. La combinación de gasificación con procesos físico-mecánicos o termoquímicos, permite generar energía (o productos útiles para la generación de energía) a la vez que se obtienen diversos productos susceptibles de valorización material. Existen varias tecnologías de tratamiento de este tipo, aunque hay tres que destacan en la bibliografía consultada: Reshment, TwinRec y Thermostelect-Process.

Reshment

La tecnología Reshment para el tratamiento del residuo de fragmentación combina un proceso de separación mecánica, un proceso de gasificación en horno ciclónico con oxígeno y un proceso de combustión con aporte de aire (Schaub, 2002). Esta tecnología permite aprovechar el contenido energético del residuo de fragmentación para generar energía (que se consume en los procesos propios del tratamiento y en otros procesos externos) y separar diversos metales que son destinados a la industria metalúrgica para su reciclado.

Según los estudios consultados, esta tecnología tiene un alto potencial para el tratamiento del residuo de fragmentación (Zevenhoven & Saeed, 2002; Jody & Daniels, 2006). A pesar de ello, no se han identificado plantas industriales ni plantas piloto que apliquen tal tecnología. Parece ser que estaba previsto implementar esta tecnología en Suiza, sin embargo, las instalaciones proyectadas no llegaron a implantarse por razones financieras.

TwinRec

La EBARA Corporation desarrolló la tecnología TwinRec combinando un proceso de gasificación en lecho fluido y un proceso de combustión en una cámara ciclónica. Esta tecnología permite aprovechar el contenido energético del residuo de fragmentación para generar energía y separar diversos materiales (Ando et ál., 2002). Los metales férricos y no férricos se destinan a la industria metalúrgica para su reciclado. Las escorias vitrificadas poseen una excelente resistencia al lixiviado, de modo que pueden emplearse como material de relleno en la construcción. Las cenizas y otros materiales inertes se depositan en vertedero. Los residuos generados en la unidad de tratamiento de gases de combustión también suelen depositarse en vertedero.

Actualmente, existe una planta industrial –situada en Japón– que aplica esta tecnología para tratar residuos de fragmentación procedentes del fin de vida de vehículos. Esta planta tiene una capacidad de tratamiento de tratamiento de 100.000 t/año de residuo (70% de residuo de fragmentación y 30% de lodos de depuradora).

Thermoselect-Process

La tecnología Thermoselect-Process combina un proceso de gasificación a alta temperatura de la fracción orgánica y un proceso de fusión directa de la fracción inorgánica. Esta tecnología permite recuperar el contenido energético del residuo de fragmentación, así como minerales vitificados, metales ricos en hierro y azufre, a la vez que evita la generación de cenizas, escorias y polvo de filtración. Los metales se destinan a la industria metalúrgica para su reciclado, mientras que los minerales pueden sustituir a otros minerales de origen natural. Además, el tratamiento del agua de proceso permite obtener subproductos como sal y cinc, que pueden reutilizarse en otros procesos industriales.

Existen tres plantas industriales operativas –situadas en Alemania, Italia y Japón– que aplican esta tecnología. La planta de Alemania trata 225.000 t/año de residuos, entre los que se incluye el residuo de fragmentación, mientras que la planta de Japón trata 100.000 t/año de residuo de fragmentación procedente del fin de vida de vehículos.

4. Discusión

El presente estudio ha permitido conocer la composición y las principales características del residuo de fragmentación derivado de los VFUs. Tras analizar múltiples estudios, se ha concluido que el residuo de fragmentación es una mezcla heterogénea compleja de diversos materiales que presenta dificultades en su tratamiento como residuo, cuando se pretenden separar o aislar las distintas fracciones materiales que lo forman. Dado que la composición original de los vehículos de los que procede el residuo de fragmentación no es homogénea ni constante y, dado que, además, es el resultado de la aplicación –o no– de múltiples procesos en los centros autorizados de tratamiento y en las instalaciones de fragmentación al residuo de VFUs, el residuo de fragmentación no muestra una composición material homogénea. Esta variabilidad material supone a su vez una elevada inestabilidad de sus propiedades químicas y físicas. La bibliografía consultada muestra como las propiedades del residuo de fragmentación varían hasta por la composición granulométrica del residuo.

Por otro lado, el estudio del residuo de fragmentación ha permitido identificar las cuestiones principales que se deben de considerar en su tratamiento. Además de la variabilidad y heterogeneidad, la presencia de materiales de distinta naturaleza (polímeros, minerales, metales, sustancias contaminantes o tóxicas, etc.), la coexistencia de materiales con distintos tamaños de partícula, así como sus propiedades energéticas serían las cuestiones fundamentales que dichas tecnologías deben resolver de forma satisfactoria. En consonancia con dichas cuestiones, se han determinado cuáles son las cuatro principales

tendencias tecnológicas para tratar el residuo de fragmentación: el depósito en vertedero, el tratamiento físico y mecánico avanzado, el tratamiento térmico y químico para la recuperación material y energética, y los tratamientos combinados o híbridos.

La primera tecnología de tratamiento seleccionada ha sido el depósito en vertedero. Esta opción es la más extendida actualmente, si bien la presión legislativa –a través de la Directiva 2000/53/CE– hace que sea una opción a eludir en el futuro.

El segundo grupo de está formado por aquellas tecnologías que aprovechan las características físicas y mecánicas del residuo para la separación y posterior aprovechamiento de las distintas fracciones materiales. Existen diversas alternativas que, en algunos casos, podrían considerarse parecidas al tratamiento que se aplica en las instalaciones de fragmentación y medios densos. De entre ellas se han seleccionado dos tecnologías que presentan un elevado potencial para lograr mayores tasas de recuperación: VW-Sicon y ANL. Con similitudes y diferencias, puede decirse que ambas promueven la extracción de las fracciones poliméricas –con mayor o menor éxito– y la separación de los metales presentes en el residuo. Otra característica común es la generación de residuos sólidos o líquidos y la no generación –o muy escasa generación– de emisiones directas a la atmósfera. Si bien existen diferencias entre los procesos unitarios aplicados y el rendimiento de cada una de ellas, la principal reseña que debe hacerse es que sólo la tecnología VW-Sicon se aplica a nivel industrial, en concreto en tres plantas de tratamiento europeas.

En el grupo de tecnologías basadas en el tratamiento térmico y químico para la recuperación material y energética del residuo de fragmentación se han identificado cinco tecnologías de tratamiento, como son: hidrólisis, co-incineración con residuos sólidos municipales, incineración en horno de cementera para la recuperación material y energética, el tratamiento pirolítico Citron y la gasificación secuencial en horno rotativo. La hidrólisis permite, a partir de residuos que contengan materia orgánica, generar un combustible líquido. Se trata de una tecnología ya aplicada a nivel industrial para otros residuos con elevado contenido de materia orgánica, de la que sólo se tiene evidencia de pruebas y ensayos industriales en el caso del residuo de fragmentación. La co-incineración del residuo de fragmentación con otros residuos en incineradores de residuos sólidos municipales y la combustión en hornos de cementera comparten el principio básico de la combustión. Ambas tecnologías están implantadas ampliamente a nivel industrial. La inclusión del residuo de fragmentación como residuo a tratar depende fundamentalmente de las limitaciones inherentes para cada tipo de instalación. La co-incineración con residuos sólidos municipales tiene como principales beneficios la recuperación de energía y la reducción del volumen de residuos a remitir a vertedero. La combustión en horno de cementera permite recuperar la energía contenida, evitar la utilización de carbón y materias primas, y limitar la generación de residuos sólidos. Existe una planta industrial que trata el residuo de fragmentación mediante la tecnología pirolítica Citron para obtener diversos concentrados sólidos. Además de la obtención de estos productos, esta tecnología reduce significativamente el volumen de residuos a tratar posteriormente. La tecnología de gasificación secuencial en horno rotativo es una tecnología implementada a nivel industrial para otros residuos en la que se puede sustituir los residuos habituales por residuo de fragmentación. Al igual que sucedía con la co-incineración con residuos sólidos municipales, los principales beneficios de esta tecnología son la recuperación de energía y la reducción del volumen de residuos a depositar en vertedero.

En el último grupo de tecnologías se han seleccionado las tecnologías denominadas Reshment, TwinRec y Thermostelect-Process. Reshment combina un tratamiento de separación –extracción de fracciones inertes y metálicas– y granulación del material restante, con la gasificación del material granulado y la combustión del gas de síntesis para producir energía eléctrica y reducir el volumen de residuos a depositar en vertedero. No existen evidencias sobre su implantación en ninguna planta industrial o piloto. La tecnología

TwinRec combina la gasificación del residuo de fragmentación con la combustión del gas de síntesis obtenido, de modo que se recupera la energía del residuo en forma de electricidad. Existe al menos una planta industrial en Japón que aplica esta tecnología al residuo de fragmentación. Thermoselect-Process se basa en la gasificación del residuo de fragmentación a elevada temperatura, de modo que el gas de síntesis obtenido se pueda utilizar para la producción de productos químicos como el metanol o para la generación de energía eléctrica. Se aplica en tres plantas industriales en todo el mundo.

5. Conclusiones

Debe destacarse que sólo el depósito en vertedero, la co-incineración con residuos sólidos municipales y la combustión en horno de cementera se aplican generalmente a los residuos de fragmentación (además de a otros residuos). La tecnología más habitual, con una gran diferencia entre las cantidades tratadas, es el depósito en vertedero. El resto, aún cuando son tecnologías comúnmente aplicadas para otros residuos o materiales, en el mejor de los casos sólo son aplicadas en unas pocas instalaciones industriales en todo el mundo. En otros, como en el caso de Reshment, puede que ni siquiera exista una instalación industrial o piloto. Ante la poca difusión de las tecnologías disponibles, puede concluirse que el principal problema que plantea el residuo de fragmentación –además de la problemática que supone el tener que tratar un residuo heterogéneo, complejo y variable– es no contar con tecnologías más o menos estandarizadas o comunes que permitan y faciliten la existencia de plantas e instalaciones de tratamiento operativas a lo largo de la geografía en donde se genera el residuo.

Referencias

- Ambrose, C., Hooper, R., Potter, A., & Singh, M. (2002). Diversion from landfill: quality products from valuable plastics. *Resource, Conservation and Recycling*, 36.
- Ando, G., Steiner, C., Selinger, A., & Shin, K. (2002). Automobile Shredder Residue Treatment in Japan - Experience of 95.000 t ASR Recycling and Recovery available for Europe through TwinRec. *International Automobile Recycling Congress*. Geneva.
- Boughton, B., & Horvath, A. (2006). Environmental assessment of shredder residue management. *Resources, Conservation and Recycling*, 47, 1-25.
- Changing World Technologies Inc. (2011). <http://www.changingworldtech.com>.
- Ciacci, L., Morselli, L., Passarini, F., Santini, A., & Vassura, I. (2010). A comparison among different automotive shredder residue treatment processes. *Inter. Journal of LCA*.
- Citron. (2010). *Rapport de développement durable 2009*. Citron.
- Das, S., Curlee, T., Rizy, C., & Schexnayder, S. (1995). Automobile recycling in the United States: energy impacts and waste generation. *Resource, Conservation and Recycling*, 265-284.
- Doka, G. (2009). *Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services*. ecoinvent report N° 13. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, St. Gallen.
- European Environment Agency. (2009). *Registro Europeo de Emisiones y Transferencias de Contaminantes*. <http://prtr.ec.europa.eu/IndustrialActivity.aspx>
- Eurostat. (2011). *End-of-life vehicles, Data 2006 – 2008*. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/wastestreams/elvs>
- Gallon, N., & Binder, M. (2006). *Life Cycle Inventory (LCI) of Argonne's Process for Recycling Shredder Residue*. PE Europe GmbH.

- GHK & Bio Intelligence Service. (2006). A study to examine the benefits of the End of Life Vehicles Directive and the costs and benefits of a revision of the 2015 targets for recycling, re-use and recovery under ELV Directive. Final Report, DG Environment.
- Glavagno, S., Fortuna, F., Cornacchia, G., Casu, S., Coppola, T., & Sharma, V. (2001). Pyrolysis process for treatment of automobile shredder residue: preliminary experimental results. *Energy Conv. & Management*, 42, 573-586.
- Jody, B., & Daniels, E. (2006). End-of-life vehicle recycling: the state of the art of resource recovery from shredder residue. Argonne National Lab., Energy Systems Division.
- Keller, C. (2003). Optimised disposal of automotive shredder residue. (C. Ludwing, S. Hellweg, & S. Stucki, Eds.) *Municipal Solid Waste Management*, 294-307.
- Lanoir, D., Trouvé, G., Delfosse, L., Froelich, D., & Kassamaly, A. (1997). Physical and chemical characterisation of automotive shredder residues. *Waste Management and Resource*, 15, 267-276.
- Mancini, G., Tamma, R., & Viotti, P. (2010). Thermal process of fluff: preliminary test on a full-scale treatment plant. *Waste Management*, 30, 1670-1682.
- Mirabile, D., Pistelli, M., Marchesini, M., Falciani, R., & Chiapelli, L. (2002). Thermal valorisation of automobile shredder residue: injection in blast furnace. *Waste Management*, 22, 841-851.
- Moakley, J., Weller, M., & Zelic, M. (2010). An evaluation of Shredder Waste Treatments in Denmark: alternative methods to landfilling Auto Shredder Residue in compliance with the strict environmental quota by the European Union.
- Murray, A., & Price, L. (2008). Use of alternative fuels in cement manufacture: analysis of fuel characteristics and feasibility for use in the Chinese Cement Sector. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Nemry, F., Leduc, G., Mongelli, I., & Uihlein, A. (2008). Environmental improvement of passenger cars (IMPRO-car). European Commission Joint Research Centre Institute for Prospective Technological Studies.
- Schaub, M. (2002). The Reshment process. Swiss Auto Recycling Foundation, 7.
- SIGRAUTO. (2001). Informe de resultados del proyecto Valorización energética de residuos generados durante y al final de la vida de los vehículos. <http://www.sigrauto.com/sigrau.html>
- Vermeulen, I., Van Caneghem, J., Block, C., Baeyens, J., & Vandecasteele, C. (2011). Automotive shredder residue (ASR): reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals' valorisation. *Journal of Hazardous Materials*, 190, 8-27.
- Zevehoven, R., & Saeed, L. (2002). Automotive shredder residue (ASR) and compact disc (CD) waste: options for recovery of materials and energy. Final report for study funded by Ekokem Oy Ab.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Carlos Muñoz Marzá
Phone: + 34 964729252
Fax: + + 34 96 387 91 73
E-mail: zapecarlos@gmail.com
URL: <http://www.gid.uji.es>