

A. Lopez-Uriónabarrenechea, N. Gastelu, E. Acha, B.M.  
Caballero, J. Alonso-Losada, I. de Marco

Departamento de Ingeniería Química y del Medio Ambiente, Escuela de Ingeniería (UPV/EHU), Bilbao, 48013, España

## Beneficio económico y energético de un método de tratamiento de vapores en el reciclado de residuos de fibra de carbono por pirolisis

### RESUMEN

#### Historia del artículo:

Recibido 5 de Mayo 2017

En la versión revisada 5 de Mayo 2017

Aceptado 31 de Mayo 2017

Accesible online 21 de Junio 2017

#### Palabras clave:

Fibra de carbono

Reciclado

Materiales compuestos

Pirolisis

La creciente utilización de materiales compuestos de fibras de carbono en la industria conlleva la generación de grandes cantidades de este tipo de residuos. Esta tendencia ha incentivado en los últimos años la investigación de diferentes alternativas de reciclaje de estos residuos con el objetivo de recuperar las fibras de carbono, material de alto valor económico específico. De entre estas alternativas, la pirolisis es la única que ha llegado a desarrollarse a escala comercial. Este proceso consiste en calentar el residuo en atmósfera inerte o pobre en oxígeno, provocando la descomposición de la resina polimérica del material y permitiendo la recuperación de las fibras de carbono. La resina se descompone en vapores orgánicos, que habitualmente son incinerados y evacuados por chimenea.

El objetivo de este artículo es presentar el beneficio económico y energético de un método de tratamiento de los vapores de la descomposición de la resina, a través del cual se pueden obtener productos químicos de valor, evitando la incineración y emisión de gases. Mediante la aplicación de este método, recientemente patentado, se puede obtener un gas con un contenido energético superior al de los vapores sin tratar y con un elevado contenido en hidrógeno, que podría separarse y comercializarse, lo que aumentaría en 6 veces el valor económico de esta fracción gaseosa en comparación con el valor de esos mismos vapores sin tratar.

## Economic and energy benefit of a method for treating the vapors coming from the recycling of carbon fiber waste by pyrolysis.

### ABSTRACT

#### Keywords:

Carbon fiber

Recycling

CFRP

Pyrolysis

The growing utilization of carbon fiber reinforced polymers (CFRP) in industry involves the generation of high quantities of this kind of waste. This tendency has fomented the investigation of different alternatives to recycle CFRP waste with the aim of reclaiming the carbon fibers, a material with high specific economic value. Among the alternatives, pyrolysis is the only one running at commercial scale nowadays. This process consists on heating the waste in an inert or oxygen-poor atmosphere, which causes the decomposition of the polymeric resin of the material and consequently the reclamation of the carbon fibers. The resin decomposes into organic vapors, which are normally incinerated and released to the atmosphere.

The objective of this paper is to present the economic and energy benefit of a method for treating the vapors coming from the resin decomposition, through which high value chemicals can be obtained, avoiding the vapors incineration and emission. By means of this recently patented method a gas fraction with a higher energetic content than that of the vapors without treatment can be obtained. Besides, this gaseous fraction contains high quantities of hydrogen, which could be separated and sold. The commercialization of this hydrogen could increase 6 times the economic value of the gaseous fraction compared to the gas fraction without treatment.

## 1 Introducción

El aumento de la generación de los residuos de materiales compuestos de fibra de carbono (CFRP) no tardará mucho en llamar la atención de los dirigentes de la Comisión Europea, que probablemente terminen por desarrollar un texto legal que afecte a este tipo de residuos y en el que se obligue a los generadores a asegurar un determinado porcentaje de reciclado, tal y como ha sucedido con anterioridad con otro tipo de residuos generados en sectores similares, entre ellos, los neumáticos fuera de uso (NFU), los vehículos fuera de uso (VFU) o los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).

Las vías de reciclado de CFRP son principalmente tres: el reciclado mecánico, el reciclado químico y el reciclado térmico [1-3]. El reciclado mecánico consiste en triturar los residuos de CFRP y realizar una separación de los trozos triturados, habitualmente en un ciclón, tamiz o tecnología similar. De esta forma se pueden obtener dos fracciones, una rica en fibra y otra pulverulenta rica en resina. Estas fracciones se pueden utilizar como relleno o refuerzo de nuevos composites o en la construcción (cemento, madera plástica), pero en general esta vía de reciclado no es la más deseada porque no se puede recuperar la fibra separada de la matriz polimérica. El reciclado químico consiste en disolver la matriz polimérica mediante compuestos químicos que disuelvan la matriz y no las fibras. Estos compuestos pueden ser ácidos (nitríco, sulfúrico), fuertes oxidantes (peróxido de hidrógeno), alcoholes o fluidos en condiciones super-críticas. Este método permite recuperar las fibras separadas de la matriz pero no tiene implantaciones a escalas mayores que la de laboratorio porque es necesaria la utilización de grandes cantidades de reactivos químicos, en ocasiones de cierta peligrosidad y en otras ocasiones bajo condiciones de proceso muy exigentes (condiciones super-críticas), lo que plantea problemas económicos, medioambientales y de seguridad.

La tercera vía de reciclado es el reciclado térmico, basado principalmente en el proceso de pirólisis. La pirólisis es la descomposición térmica de sustancias orgánicas en ausencia de oxígeno. En el caso de los residuos de CFRP, bajo las condiciones de pirólisis se descompone la resina polimérica pero no las fibras de carbono, por lo que se pueden recuperar las fibras separadas de la resina. Estas fibras quedan impregnadas con un residuo carbonoso generado en la descomposición de la resina, generalmente conocido como "char", que puede eliminarse en el propio reactor tras la etapa de pirólisis con la introducción de aire a una temperatura, un caudal y durante un tiempo controlados para evitar la oxidación de las fibras de carbono. Por ello esta etapa se denomina "oxidación controlada". La utilización de aire durante todo el proceso (sin etapa de pirólisis) supone una importante pérdida de la resistencia a la tracción de las fibras recuperadas debido a la oxidación de las mismas, por lo que no es recomendable realizar un tratamiento oxidativo desde el principio [2, 4].

La tecnología de pirólisis aplicada al reciclado de CFRP es la que más se ha desarrollado a escala mayor que la de laboratorio. En el momento actual se tiene constancia de 6 instalaciones de tratamiento de residuos de CFRP, sin poder determinar si algunas de ellas siguen en funcionamiento o no.

El éxito del proceso de pirólisis de CFRP depende esencialmente de la gestión que se haga con los productos que se generan en la descomposición de la resina, que son una mezcla de gases y de vapores cuya composición depende del tipo de resina pirolizada y de las condiciones de proceso utilizadas. Existen dos alternativas para gestionar los productos de la descomposición de la resina:

(1) Quemar la mezcla de gases y vapores en quemadores a alta temperatura sin permitir el enfriamiento de estos últimos, con el objetivo de generar energía para el proceso. Esto es posible porque la mayoría de los compuestos que aparecen en esa mezcla de gases y vapores son combustibles, de forma que se puede obtener energía a través de sus reacciones de combustión. Se trata de la opción más usada actualmente.

(2) Enfriar la corriente de gases y vapores, lo que conlleva la condensación de los vapores, obteniendo unos productos líquidos y otros gaseosos, pudiendo utilizarse ambos ya sea como combustible o, en el mejor de los casos, como fuente de materias primas o productos químicos.

Los autores del presente artículo han desarrollado un método de tratamiento de los gases y vapores de pirólisis que permite optar por la opción 2 pero eliminando sus desventajas y potenciando sus fortalezas. Se trata de un tratamiento que se realiza a la mezcla de gases y vapores antes de la etapa de condensación. Mediante este tratamiento se minimiza la cantidad de líquido y se genera mayor cantidad de gas con una proporción de hidrógeno muy elevada, lo que permite plantear su separación del resto de componentes del gas y su comercialización. Cabe destacar que además se consigue la eliminación de la fracción orgánica del producto líquido condensado, que queda compuesto principalmente por agua. La producción de hidrógeno y la eliminación del líquido orgánico son las dos grandes fortalezas del proceso. Además, el tratamiento es versátil y permite ajustes y diferentes configuraciones en función del tipo de resina que compone el CFRP y de los resultados que se quieran obtener.

En este artículo se presenta el análisis económico del tratamiento de gases y vapores y su comparación con la tecnología más utilizada actualmente, la combustión de los mismos.

## 2 Metodología

Los resultados presentados en este informe se han obtenido con una muestra de pre-preg caducado, concretamente del pre-preg HexPly M21 de Hexcel, con un contenido en fibra del 63% en peso. La muestra se encuentra en forma de rollo de 30 cm de ancho. En cada ensayo se utilizan 100 g de muestra en forma de una tira de 1 m de largo y 7 cm de ancho.

Los experimentos se han realizado con una instalación de laboratorio (Figura 1) en la que el reactor de pirólisis (donde se introduce el residuo) tiene un volumen de 3.5 L. En él se lleva a cabo la pirólisis del pre-preg y la oxidación controlada de las fibras después de la pirólisis. La etapa de pirólisis consiste en el calentamiento del material desde temperatura ambiente hasta 500 °C, con una velocidad de calentamiento de 3 °C min<sup>-1</sup>. Durante ese calentamiento se van generando los gases y vapores de la descomposición de la resina del CFRP, que pasan a la unidad de tratamiento. No se describen los detalles



de este tratamiento por estar bajo protección de patente [5]. A la salida de esta unidad se enfrían los productos por intercambio de calor con el aire ambiente y con agua a temperatura de red.

Los productos condensados se recogen en recipientes de vidrio, mientras que los gases, una vez filtrados en una columna de carbón activado, se recogen en bolsas Tedlar impermeables para gases. Una vez finalizada la pirólisis se introduce aire sintético en el reactor manteniendo la temperatura de 500 °C, para realizar la oxidación controlada del char durante 45 minutos.



Figura 1. Instalación de laboratorio.

## 3 Resultados

### 3.1 Rendimientos y composición de gases

En las Tablas 1 y 2 se muestran los resultados obtenidos con la aplicación del tratamiento (T1 y T2) en comparación con los obtenidos si no se aplica dicho tratamiento (ST) antes del enfriamiento de los vapores, con el objetivo de demostrar la gran eficacia del método de tratamiento. El método es versátil y se puede utilizar en configuraciones distintas en función de la resina a tratar y de la composición de gas que se quiera conseguir. En esta sección, se han incluido dos configuraciones distintas del método (T1 y T2). Estas configuraciones se compararán a lo largo de todo el informe.

Tabla 1. Rendimientos (% peso)

	ST	T1	T2
<b>Sólidos</b>	<b>80.7</b>	<b>79.6</b>	<b>79.2</b>
<b>Líquidos totales</b>	<b>15.9</b>	<b>3.9</b>	<b>4.9</b>
Liq orgánicos	6.7	0.0	0.0
Liq acuosos	9.2	3.9	4.9
<b>Material en filtro</b>	<b>0.4</b>	<b>0.9</b>	<b>0.4</b>
<b>Gases*</b>	<b>3.0</b>	<b>15.6</b>	<b>15.5</b>

\*Por diferencia

En la Tabla 1 se pueden observar los rendimientos obtenidos tras la etapa de pirólisis (sin oxidación controlada) para las tres tecnologías comparadas. Tal y como se puede ver, el rendimiento de sólidos es similar en todos los experimento ( $\approx 80\%$  peso) y mayor que el contenido de fibra de este pre-

preg (63% peso). Esto se debe a la generación de char y restos de resina sin descomponer que, tal y como se ha comentado en el estado del arte, es un fenómeno común a todos los procesos de pirólisis de CFRP. Este char puede eliminarse con una etapa de oxidación controlada, siendo esta la práctica habitual en las instalaciones comerciales de reciclaje de CFRP por pirólisis. El porcentaje restante ( $\approx 20\%$  peso) son los vapores y gases de la descomposición de la resina, es decir, esta es la cantidad que se quema en el caso de que los vapores y gases se utilicen para aportar energía al proceso. La gran mayoría de los compuestos de esta mezcla, si no se queman y no se aplica el método de tratamiento de vapores aquí presentado, condensa al enfriar ( $\approx 16\%$  peso), generando un líquido compuesto por una fase orgánica (6.7% peso) y una fase acuosa (9.2% peso), tal y como se aprecia en la columna "ST" de la Tabla 1. Además, la generación de gases es muy baja (3.0% peso). Estos resultados coinciden con los obtenidos por otros investigadores, así como por los autores del informe, en trabajos realizados anteriormente [6-8].

El reparto entre líquidos y gases cambia radicalmente cuando se aplica el método de tratamiento de los vapores. Tal y como se puede observar en los resultados obtenidos con T1 y T2, la generación de líquidos disminuye hasta un 4-5% en peso, generándose por consiguiente más de un 15% en peso de gases. Además, los líquidos son completamente acuosos, lo que significa que se ha eliminado la fracción orgánica de los mismos, la cual, como se demostrará a continuación, tiene escasa utilidad industrial y la consideración de residuo peligroso en caso de tener que ser gestionada como residuo. La eliminación de los líquidos orgánicos para convertirlos en gases aprovechables es uno de los resultados más importantes de la aplicación del método de tratamiento de gases y vapores.

En la Tabla 2 se muestra la composición y el poder calorífico superior (PCS) de los gases obtenidos en estos tres tipos de ensayos.

Tabla 2. Composición (% volumen determinado por GC-TCD/FID) y PCS de los gases

	ST	T1	T2
<b>H<sub>2</sub></b>	0.0	53.7	72.6
<b>CO</b>	97.0	19.5	19.5
<b>CO<sub>2</sub></b>	3.0	7.9	0.2
<b>CH<sub>4</sub></b>	0.0	17.8	7.7
<b>C<sub>2</sub></b>	0.0	1.1	<0.1
<b>PCS (MJ kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>11.2</b>	<b>28.3</b>	<b>39.1</b>

La composición de los gases ha sido determinada por cromatografía gaseosa (GC) acoplada a un detector de conductividad térmica (TCD) y a otro de ionización de llama (FID). El término C2 se refiere a la agrupación de compuestos orgánicos de 2 átomos de carbono. Aparte de los compuestos mostrados en la Tabla 2, en el gas de pirólisis recogido en las bolsas existen otros compuestos gaseosos no detectados por nuestros equipos de análisis que no se han incluido porque no han sido identificados. Por lo tanto, los porcentajes mostrados en esta tabla representan los porcentajes máximos que se pueden obtener de estos compuestos en los tres casos. El PCS de los gases se ha calculado de forma teórica



conociendo el PCS de cada uno de los componentes del gas y la composición del mismo.

La Tabla 2 muestra de nuevo muy claramente la alta efectividad del método de tratamiento de vapores. En ausencia de este, los gases obtenidos están compuestos principalmente por CO (97% volumen), con cierta cantidad de CO<sub>2</sub> (3% volumen), y tienen un PCS de 11.2 MJ kg<sup>-1</sup>. El contenido energético de estos gases es muy bajo, por lo que la energía que se puede recuperar de ellos es limitada. Este bajo rendimiento también limita la utilización de estos gases como fuente de CO. Las propiedades del gas de pirólisis cambian radicalmente cuando se utiliza el tratamiento de vapores. El gas obtenido en T1 está compuesto en más del 50% en volumen por H<sub>2</sub>, con cantidades también apreciables de CO y CH<sub>4</sub>, y posee un PCS de 28.3 MJ kg<sup>-1</sup>. Las altas cantidades de H<sub>2</sub> hacen que pueda plantearse la separación como compuesto puro y pueda ser utilizado en alguna de sus múltiples aplicaciones, mencionadas en el estado del arte. Además, debido al alto contenido energético de la mezcla de gases, estos pueden utilizarse como combustible aún tras la separación del hidrógeno. Recordemos además que la cantidad de gas generada es más de tres veces mayor que la generada en ausencia de tratamiento, tal y como se muestra en la Tabla 1. Los resultados obtenidos en el tratamiento T2 son aún mejores, con una proporción de H<sub>2</sub> en los gases mayor del 70% en volumen y una reducción importante en el contenido de CO<sub>2</sub>, lo que hace que el PCS de estos gases sea de casi 40 MJ kg<sup>-1</sup>, muy similar al del gas natural. En este caso, además de ser posible la generación de mayores cantidades de H<sub>2</sub> puro, se mantendría un PCS aún muy elevado en los gases después de la separación del H<sub>2</sub>. Este resultado es muy interesante desde el punto de vista científico, aunque requeriría un mayor gasto económico, como se verá en las secciones posteriores del informe.

Los resultados mostrados en esta sección demuestran el indudable interés del método de tratamiento de vapores diseñado por los autores de este informe, en comparación con la condensación de los vapores en ausencia de tratamiento. En las secciones siguientes el método de tratamiento de los vapores será comparado económica y energéticamente con la tecnología que actualmente se utiliza a escala semi-industrial (pirólisis de CFRP + combustión de vapores), con el objetivo de mostrar la ventaja competitiva que podría significar la implementación de este método de tratamiento como alternativa a la simple combustión de los vapores.

### 3.2 Análisis económico

El cálculo del rendimiento económico se ha realizado comparando la tecnología que actualmente se utiliza a escala semi-industrial (pirólisis de CFRP + combustión de vapores) con la tecnología desarrollada por los autores del informe (pirólisis de CFRP + tratamiento de vapores), y en esta última se han analizado las dos configuraciones mostradas en la sección 3.1 (T1 y T2). En el cálculo no se han tenido en cuenta la amortización de las instalaciones, la mano de obra, ni los gastos generales. Los gastos y beneficios son los relativos a lo obtenido a escala de laboratorio. El impacto del cambio de escala en el análisis económico no ha sido cuantificado en este artículo, si bien se hace alguna referencia de forma cualitativa. Dicha cuantificación implicaría un estudio bastante más amplio y complejo.

En la Tabla 3 se muestran los ingresos y gastos de los tres experimentos y el balance económico. En esta tabla se ha ajustado el precio de las fibras de carbono recuperadas para que el balance económico sea aproximadamente 0 para la tecnología de menor coste.

**Tabla 3.** Balance económico de un experimento de reciclado de 100 g de CFRP con combustión de vapores y con dos tipos de tratamiento de vapores.

MATERIAL	Precio (€/kg) (€/kWh)	Cantidad (g) (kWh)	ST (€)	T1 (€)	T2 (€)
<b>INGRESOS</b>					
Residuo CFRP	0.1	100	0.010	0.010	0.010
Fibras carbono	20	63	1.260	1.260	1.260
Hidrógeno ST	12	-	-		
Hidrógeno T1	12	1.4		0.017	
Hidrógeno T2	12	2.0			0.024
Gases ST	0.092	0.069	0.0063		
Gases T1	0.092	0.020		0.0018	
Gases T2	0.092	0.041			0.0039
<b>INGRESOS (€)</b>			<b>1.2763</b>	<b>1.2888</b>	<b>1.2979</b>
<b>GASTOS</b>					
Reactivos			0.846	0.404	0.562
Residuos			0.005	0.006	0.0055
Electricidad			0.448	0.767	0.905
<b>GASTOS (€)</b>			<b>1.299</b>	<b>1.177</b>	<b>1.4725</b>
<b>BALANCE (€)</b>			<b>-0.023</b>	<b>0.1118</b>	<b>-0.175</b>

De la Tabla 3 se desprende que T1 se presenta como una tecnología más barata que la combustión, mientras que la utilización de T2, que tal y como se muestra en la Tabla 2 conlleva más producción de H<sub>2</sub>, también supone un mayor coste económico. Es decir, el método T1 desarrollado por los autores del artículo presenta un menor gasto que la tecnología utilizada actualmente.

Entrando en detalle, el primer dato que se desprende del análisis económico presentado en la Tabla 3 es que el precio de venta de las fibras de carbono es un parámetro esencial para la economía del proceso, por lo que es fundamental determinar las propiedades y potenciales aplicaciones de las fibras tras el proceso de reciclado. Aún así, 20 €/kg es un precio bastante competitivo dado el valor de mercado de este material. Además, tal y como se comentará a continuación, un aumento de escala permitiría procesar más cantidad de residuo para un mismo consumo energético, lo que permitiría reducir este precio de venta aún más.

En el caso del tratamiento de vapores, la partida más elevada de gasto es el consumo eléctrico, ya que el tratamiento de vapores se realiza con horno eléctrico, con mayor consumo en el caso de T2. Este es un problema asociado a la escala de laboratorio, ya que el impacto del cambio de escala en el consumo eléctrico haría que el coste de los tratamientos T1 y T2 fuera aún mucho menor. Es decir, aún asumiendo un calentamiento a través de resistencias eléctricas, el



tratamiento de 1 kg de residuo de CFRP (10 veces más que la cantidad usada en estos experimentos) no requeriría una potencia 10 veces mayor que la usada en estas pruebas de laboratorio. La relación potencia consumida / residuo tratado va disminuyendo conforme aumenta la escala del proceso.

Con todo ello, la rentabilidad del proceso de tratamiento se espera sea mayor con el aumento de la escala de la tecnología y por cambios en algunas prácticas, ya que la investigación realizada a escala de laboratorio está centrada en la consecución de los mejores resultados científicos posibles, sin reparar excesivamente en los consumos que ello requiere. A modo de ejemplo, las operaciones de limpieza de los materiales que realizamos a nivel de laboratorio (representan el 32 y el 27% del gasto en electricidad de T1 y T2 respectivamente) son operaciones que se han implantado sin un análisis de las opciones más baratas y en las que en ningún momento se ha buscado una reducción del gasto, ni se han optimizado en ese sentido, por lo que es más que probable que los gastos en esas operaciones se reduzcan considerablemente en una implantación semi-industrial. En la misma línea, tampoco se ha estudiado estrictamente la posibilidad de trabajar a temperaturas más bajas en la etapa de pirólisis o con tiempos de oxidación más cortos, lo que abarataría considerablemente el proceso. Es decir, la realización de ensayos con la máxima de la reducción del coste mejoraría aún más el balance económico ya positivo del tratamiento de vapores.

### 3.3 Análisis energético

En la Tabla 4 se puede observar el contenido energético de las fracciones gaseosas obtenidas en los tres experimentos. Este contenido energético se puede obtener multiplicando la cantidad de gas generado (Tabla 1) por su poder calorífico (Tabla 2).

Tabla 4. Contenido energético de los gases (kJ)

ST	T1	T2
245.4	160.2	272.7

Tal y como se aprecia en la Tabla 4, el contenido energético de los gases generados a través del tratamiento de vapores T2 es mayor que el de la fracción gaseosa sin tratamiento, mientras que en el caso de T1 el contenido energético de los gases es menor. Este es un buen resultado, ya que una vez superados los costes derivadas de la escala de laboratorio, se puede obtener un gas de mayor contenido energético que el de la tecnología utilizada actualmente. En cualquier caso, se debe recordar que la aplicación principal de este gas debe ser su utilización como fuente de hidrógeno. Para combustible se podría destinar la fracción residual resultante de la separación del hidrógeno.

## 4 Conclusiones

Las principales conclusiones de este artículo, recogidas parcialmente a lo largo del mismo, son las siguientes:

- El análisis económico de las tres tecnologías comparadas muestran que la utilización del método de tratamiento de vapores en su configuración T1 presenta el mejor balance económico, lo que permite ser

optimistas con respecto a la posible implantación del método a nivel industrial.

- El balance económico de las tres tecnologías está fuertemente influenciado por el precio de mercado de la fibra de carbono recuperada, ya que es el producto principal del proceso ( $\approx 65\%$  en peso del material de entrada).
- El método de tratamiento de vapores en su configuración T2 presenta el peor balance económico debido a su alto consumo energético, pero al mismo tiempo genera más del doble de cantidad de hidrógeno que la configuración T1, lo que puede tener una importancia sustancial en una implantación a mayor escala.
- El balance económico indudablemente será mucho mejor para instalaciones de mayor tamaño, en las que la relación consumo energético/residuo tratado disminuye drásticamente en comparación con las instalaciones de laboratorio, lo cual también permite ser optimistas con respecto a la posible implantación del método a nivel industrial.
- El análisis económico está basado en experimentos en los que no se ha buscado especialmente la reducción de costes ni de consumo de energía, por lo que presenta un amplio margen de mejora.
- De cara a la implantación industrial del proceso el análisis económico aquí realizado no puede considerarse concluyente por el hecho de haberse realizado para una instalación de laboratorio, por lo que un estudio de cambio de escala y su posterior análisis económico y energético serían de indudable interés.
- Merece la pena seguir investigando en formas de aumentar la rentabilidad de este proceso, ante la más que probable obligación legal de reciclado de residuos de CFRP en el futuro cercano.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad (CTM2013-48887-C2-1-R) y a la UPV/EHU (PPM 12/11) la financiación recibida para llevar a cabo este proyecto, así como al programa de formación de investigadores del Gobierno Vasco.

## Referencias

- [1] Pimenta S. y Pinho S.T., 2011. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste Management* 31, 378–392.
- [2] Pimenta S. y Pinho S.T., 2014. Recycling of Carbon Fibers. In: *Handbook of Recycling* (Elsevier) capítulo 19, 269-283.
- [3] Yang Y., Booma R., Irion B., van Heerden D.J., Kuiper P., de Wita H., 2012. Recycling of composite materials. *Chemical Engineering and Processing* 51, 53– 68.
- [4] Yang J., Liu J., Liu W., Wang J., Tang T., 2015. Recycling of carbon fibre reinforced epoxy resin composites under various oxygen concentrations in nitrogen–oxygen



atmosphere. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 112, 253–261.

[5] Lopez-Urionabarrenechea, A., de Marco, I., Caballero, B.M., Gastelu, N., Hernández, A., Adrados, A., Solar, J. (2016) Método para el tratamiento de vapores generados en el proceso de recuperación de fibras de carbono de composites por pirólisis. Patente Española 201530223. Oficina Española de Patentes y Marcas, [www.oepm.es](http://www.oepm.es).

[6] Lopez-Urionabarrenechea A., Gastelu N., de Marco I., Gonzalez-Blanco N., Caballero B.M., López F.A., 2015. Caracterización de fibras de carbono recuperadas por pirólisis y oxidación controlada de materiales compuestos residuales. Comunicación presentada en el XI Congreso Nacional de Materiales Compuestos celebrado en Móstoles (España).

[7] Nahil M.A. y Williams P.T., 2011. Recycling of carbon fibre reinforced polymeric waste for the production of activated carbon fibres. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 91, 67–75.

[8] Onwudili J.A., Miskolczi N., Nagy T., Lipóczy G., 2016. Recovery of glass fibre and carbon fibres from reinforced thermosets by batch pyrolysis and investigation of fibre re-using as reinforcement in LDPE matrix. *Composites Part B* 91, 154-161.

