

# Valoración energética de neumáticos fuera de uso (\*)



## SUMARIO

*Este trabajo se llevó a cabo con el objetivo de estudiar de forma exhaustiva una de las posibles alternativas en la valoración energética de neumáticos usados. La alternativa elegida es el proceso de pirólisis. Para ello, en primer lugar, se realizó un seguimiento cinético del proceso mediante datos termogravimétricos, utilizando como variable la velocidad de calentamiento. Este estudio ha permitido vislumbrar el mecanismo de las reacciones involucradas en el proceso. En una segunda fase del trabajo se llevaron a cabo ensayos de pirólisis de polvo de neumático en un reactor de horno horizontal, utilizando tres temperaturas finales de proceso y separando en cada ensayo tres fracciones: sólida, líquida y gaseosa. La producción de cada una de ellas y su composición dependen en gran medida de la temperatura final utilizada. La principal aplicación de estos productos es su utilización como combustibles, por ello se realizaron análisis de combustión de las fracciones sólida y líquida en termobalanza y de los gases asociados a dichos procesos por espectrometría de masas. Por último se realizaron ensayos de termólisis de neumáticos troceados en una planta piloto de la empresa Recuperación Materiales Diversos (RMD). En estos ensayos se separan una fracción sólida y una gaseosa. Los resultados obtenidos en estos ensayos, en lo relativo a la caracterización de ambas fracciones son muy parecidos a los obtenidos en el laboratorio, lo que confirma la similitud de ambos procesos.*

**Palabras clave:** Medio ambiente, energías renovables, pirólisis, valoración energética, neumáticos.

Investigador Principal  
OLEGARIO MARTÍNEZ MORÁN  
Doctor en Química

Equipo Investigador  
M. OTERO, L. F. CALVO, C. DÍEZ,  
M. E. SÁNCHEZ y X. GÓMEZ.  
Universidad de León

## INTRODUCCIÓN

La integración de las consideraciones ambientales se ha convertido en uno de los objetivos prioritarios de la política energética. Los procesos presentes en las actividades de captación, transformación y uso de la energía tienen una incidencia significativa sobre el medio ambiente, de forma que, la tecnología juega un papel capital en la consecución de nuevas mejoras en los rendimientos de producción y de utilización de la energía.

Las energías renovables contribuyen, por su carácter autóctono, a la re-

\* Este artículo es el resumen del trabajo presentado a la Fundación MAPFRE como resultado final de la investigación desarrollada durante el año 2001 a raíz de una beca concedida por la Fundación en la convocatoria 2001-2002.



En España, se generan más de 300.000 toneladas de neumáticos usados al año.

ducción de las tasas de dependencia energética, bien sea por su utilización alternativa a los combustibles fósiles para generar energía eléctrica o para consumo final. La valorización energética de residuos puede ser considerada como una forma de energía renovable. Los neumáticos fuera de uso (NFU's) son residuos que poseen unas características diferentes y particulares respecto a otros, entre otras cosas su compleja naturaleza que dificulta enormemente su reciclado. Una característica fundamental de este tipo de residuos es su elevado poder calorífico, hecho que es muy importante para su posible valorización energética.

En España, la tasa media de producción de NFU's es superior a 7 kg por habitante y año, lo que significa que se generan más de 300.000 toneladas de las que aproximadamente el 80% se destinan al vertido, es decir, anualmente se suman 240.000 toneladas a las más de 5 millones ya almacenadas. Para tratar de poner fin a este grave conflicto medioambiental, el Consejo de Ministros acaba de aprobar el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso, un documento que enmarca la situación estatal con respecto a este tipo de residuos y sienta las bases de los objetivos y las prácticas a desarrollar hasta el año 2007. En la actualidad, según el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso, solamente se recicla un 1,5% de este tipo de residuos, se incinera (valorización) un 7% en cinco cementeras autorizadas y se envía un 11% a otros países. Del resto se desconoce su destino final y,

aunque hay vertederos exclusivos para depositar neumáticos, no existen ni un censo ni un control directo de los mismos.

Los NFU's constituyen una fuente potencial de energía. Su relativamente elevado poder calorífico, de aproximadamente 37 MJ/kg (sin refuerzos metálicos), es comparable e incluso

*Las energías renovables contribuyen, por su carácter autóctono, a la reducción de las tasas de dependencia energética, bien sea por su utilización alternativa a los combustibles fósiles para generar energía eléctrica o para consumo final.*

superior al del carbón de buena calidad. El neumático es, por tanto, un combustible interesante y este tipo de aprovechamiento industrial está siendo utilizado para grandes volúmenes. Actualmente en EE.UU. y en Japón, el 50% de los neumáticos se valorizan recuperando energía. Aunque esta valorización consiste en utilizar los NFU's como combustibles complementarios, principalmente en hornos de cementeras, papeleras y centrales térmicas convencionales, estos tres usos suponen más del 75% de la valorización energética de NFU en EE.UU. El principal inconveniente de la combustión de neumáticos usados es la gran cantidad de productos contaminantes que se producen, que son vertidos a la atmósfera o al medio, como por ejemplo monóxido de carbono, óxidos de zinc, óxidos de plomo, benceno, tolueno, etc. Este problema, en el caso de los hornos de las cementeras (valorización energética más extendida), es paliado en parte, ya que una fracción de estas sustancias contaminantes queda retenida en el clínker.

Aparte de la combustión, existen otras técnicas para la valorización energética, con distinto grado de desarrollo tecnológico, como son la gasificación y la pirólisis que en la actualidad apenas se utilizan, pero podrían ser muy interesantes en poco tiempo. Bajo el nombre de *gasificación* se engloban los procesos de combustión en condiciones de defecto de oxígeno, con producción de monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno y metano, en proporciones diversas según la composición de la materia prima y las condiciones del proceso. La temperatura de operación oscila entre 700 y 1500°C y el oxígeno se limita entre un 10 y un 50% del teóricamente necesario para una combustión completa. La *pirólisis* consiste en la descomposición de la materia por la acción del calor en ausencia de oxígeno, proceso en el que la naturaleza y la composición de los productos finales dependen de las propiedades de la materia tratada, de la temperatura y presión de operación y de los tiempos de permanencia del material en la unidad de pirólisis. Los productos obtenidos tras este proceso son: gases, compuestos por hidrógeno, óxidos de carbono e hidrocarburos; líquidos hidrocarbonados y un residuo sólido carbonoso. La *termólisis*, como caso particular de la pirólisis, es una descomposición de la materia por acción del calor en ausencia de oxígeno, sin producción de aceites, es decir, con esta técnica solamente se obtienen dos tipos de productos: una frac-

ción sólida y una mezcla de gases, gracias a las condiciones utilizadas.

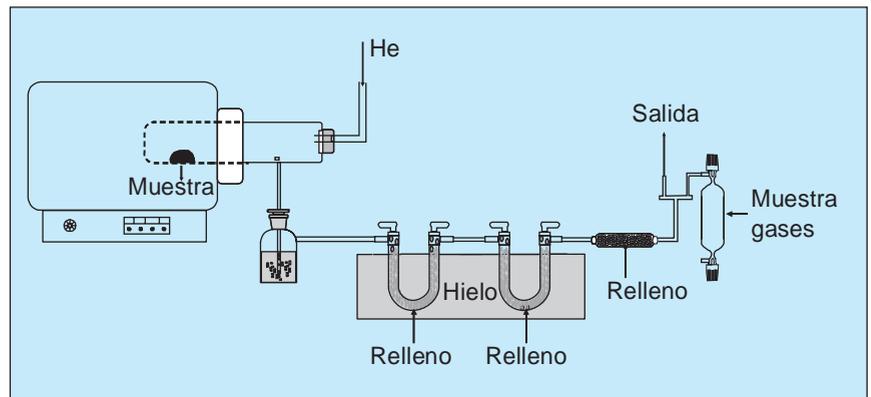
Con este planteamiento, el objetivo de este trabajo ha sido la realización de un estudio exhaustivo del proceso de pirólisis de neumáticos de cara a la valorización energética de los mismos, concretamente, de la caracterización y estudio de las propiedades como combustibles de los productos resultantes, del seguimiento de las emisiones de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> asociadas a la combustión de los productos obtenidos durante el proceso y de la comparación de resultados de la pirólisis de laboratorio con la termólisis de la planta piloto.

## MATERIAL Y MÉTODOS UTILIZADOS

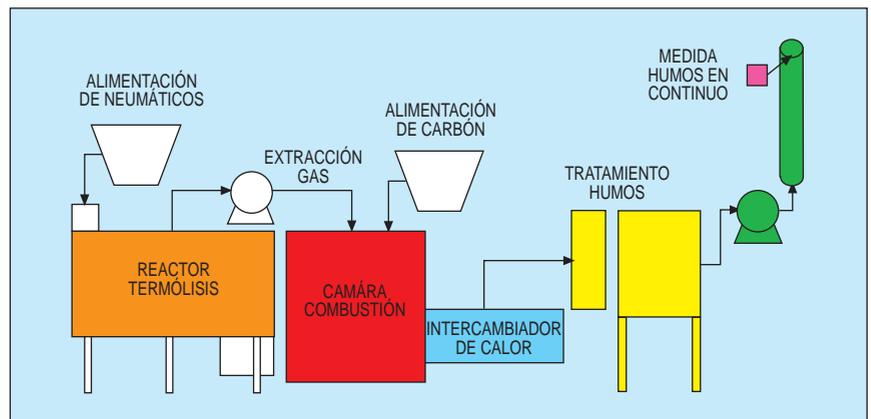
Los ensayos llevados a cabo en el laboratorio fueron realizados con neumáticos triturados de forma mecánica con un tamaño de partícula < 0,42 mm y libre de refuerzos metálicos, mientras que en los ensayos realizados en la planta piloto se utilizaron neumáticos con un tamaño de partícula entre 1 y 5 cm, facilitados por la propia empresa.

El diseño experimental de laboratorio utilizado en el presente trabajo se muestra en la *Figura 1*. Se utilizó un horno horizontal, en el que se introduce un reactor, que consiste en un tubo de cuarzo de 40 cm de longitud y 7 cm de diámetro, que se carga con la muestra. El horno se calienta, al tiempo que se pasa una corriente de helio por el reactor. Los gases producidos se pasan por una serie de trampas, cuyo objetivo es separar los líquidos condensables (aceites), recogiendo los gases no condensables, a distintas temperaturas, en ampollas de vidrio. El residuo sólido queda dentro del reactor y se recoge al final del proceso. Por otra parte, la planta piloto de la empresa Recuperación Materiales Diversos, S.A. (R.M.D.), cuyo esquema se muestra en la *Figura 2*, consta de los siguientes elementos: 1) Preparación de neumáticos para su tratamiento, consistente en la trituración de los neumáticos mediante cizallas rotativas y molinos reduciéndolos a trozos de entre 1 y 5 cm, para optimizar el proceso. 2) Reactor de termólisis, calentado con resistencias eléctricas a 550°C que opera en ausencia total de oxígeno. 3) Cámara de combustión de los gases obtenidos utilizando propano como combustible de apoyo. El residuo sólido se quema de forma discontinua. 4) Intercambiador de calor para el enfriamiento de los gases.

**FIGURA 1. Representación esquemática del diseño experimental de laboratorio.**



**FIGURA 2. Esquema de la planta de tratamiento de neumáticos de la empresa R.M.D.**



*Los neumáticos fuera de uso, constituyen una fuente potencialmente elevada poder calorífico es comparable e incluso superior al del carbón de buena calidad.*

5) Limpieza de humos utilizando como sustancia neutralizante bicarbonato sódico, separación de partículas en un filtro de mangas y control, mediante una sonda isocinética, de emisiones de NO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub>, CO y CO<sub>2</sub>.

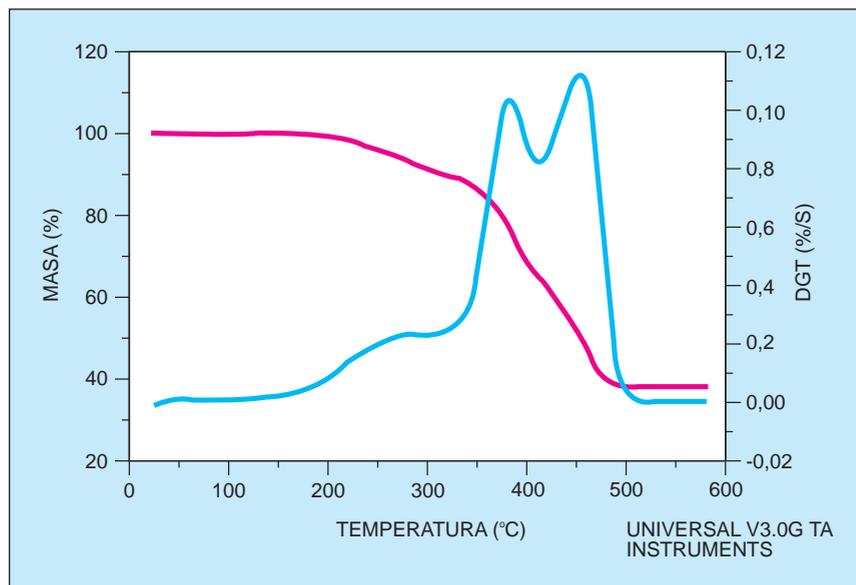
Los productos del proceso fueron analizados y caracterizados de la siguiente manera. Tanto el neumático original, como el residuo sólido y la fracción líquida se sometieron a análisis inmediato, elemental y de poder calorífico según procedimientos normalizados. Además se caracterizó su combustibilidad a través de ensayos de combustión a temperatura programada, en atmósfera controlada, en una termobalanza modelo SDT 2960, analizando, a su vez, las emisiones de la combustión con un espectrómetro de masas de la casa Balzers acoplado a la salida de la termobalanza. Las muestras gaseosas, recogidas a tres temperaturas diferentes, 350, 450 y 550 °C, fueron analizadas por cromatografía de gases, en un equipo HP 5890 Series II que cuenta con dos detectores, uno de conductividad térmica.

ca (TCD) y otro de ionización de llama (FID) y utilizando tres columnas para la determinación de los distintos componentes. Posteriormente, conocida la composición de la muestra gaseosa, se estimó su poder calorífico.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar se llevaron a cabo ensayos de pirólisis de neumáticos en un equipo termogravimétrico. El ensayo consiste en un calentamiento de la muestra, en atmósfera controlada de helio, utilizando una velocidad de calentamiento determinada, registrándose la evolución de la masa en función del tiempo o de la temperatura. Se utilizaron 5 mg de muestra y fueron calentados con una velocidad de 15 °C/min desde temperatura ambiente hasta 850 °C. En la *Figura 3* se representa la pérdida de masa (curva TGA) y la velocidad de pérdida de masa (curva DTG) en función de la temperatura. Observando la figura vemos en primer lugar que el proceso finaliza a una temperatura ligeramente superior a los 500 °C, temperatura a partir de la cual apenas se produce pérdida de masa. En cuanto a la curva DTG, podemos distinguir tres picos, que en principio

**FIGURA 3. Curvas TGA y DTG correspondientes al proceso de pirólisis de neumáticos.**



sugieren que las sustancias volátiles presentes en los neumáticos pueden dividirse en tres grupos. Algunos autores atribuyen el primer pico a la descomposición térmica de la mezcla de aceites, humedad, plastificantes y

otros aditivos, correspondiendo el segundo y tercer pico a la descomposición térmica del caucho natural –NR-, caucho de butadieno –BR- y caucho de butadieno-estireno –SBR- (principales componentes del neumático).



*Aunque hay vertederos exclusivos para depositar neumáticos, no existe ni un censo ni un control directo de los mismos.*

A partir de los datos obtenidos en el análisis térmico del proceso de termólisis de neumáticos se decidió utilizar en los ensayos de laboratorio como temperatura final del proceso 550 °C, para asegurarnos de su finalización. Además, esta temperatura coincide con la temperatura de operación de la planta piloto experimental. Los resultados de la composición, en % en masa de cada una de las fracciones del proceso obtenidas en ambos equipos, laboratorio y planta piloto, se muestran en la *Tabla 1*.

durante ambos procesos, mediante análisis térmicos en termobalanza, se muestran en las *Figuras 4 y 5*, donde se representan respectivamente las curvas TGA y DTG de las muestras sólidas. Como vemos en el análisis térmico, la combustión del neumático original se produce en varias etapas que se corresponden con la combustión de los diferentes componentes del neumático original. Esta combustión sucede en un intervalo de tempe-

raturas muy amplio, entre los 200 y 600 °C, lo que nos da una idea de la mala combustibilidad de este material. Sin embargo la combustión de la fracción sólida obtenida se produce en una sola etapa, ya que el proceso ha eliminado de esta fracción la mayor parte de los componentes volátiles del neumático, dando lugar a un residuo sólido carbonoso que se quema en un intervalo de temperaturas pequeño entre 400 y 620 °C. Las dos

**TABLA 1. Resultados de producción de cada una de las fracciones (expresado en %).**

	Reactor laboratorio	Planta piloto
Residuo sólido (%)	33	34
Aceites (%)	38	—
Gas <sup>a</sup> (%)	29	66
<sup>a</sup> Obtenido por diferencia.		

### Fracción sólida

Los resultados correspondientes al análisis elemental, inmediato y poder calorífico de la muestra original y de la fracción sólida del proceso, tanto del reactor (muestra SR) como de la plan-

**TABLA 2. Análisis inmediato, elemental y de poder calorífico del neumático y de la fracción sólida.**

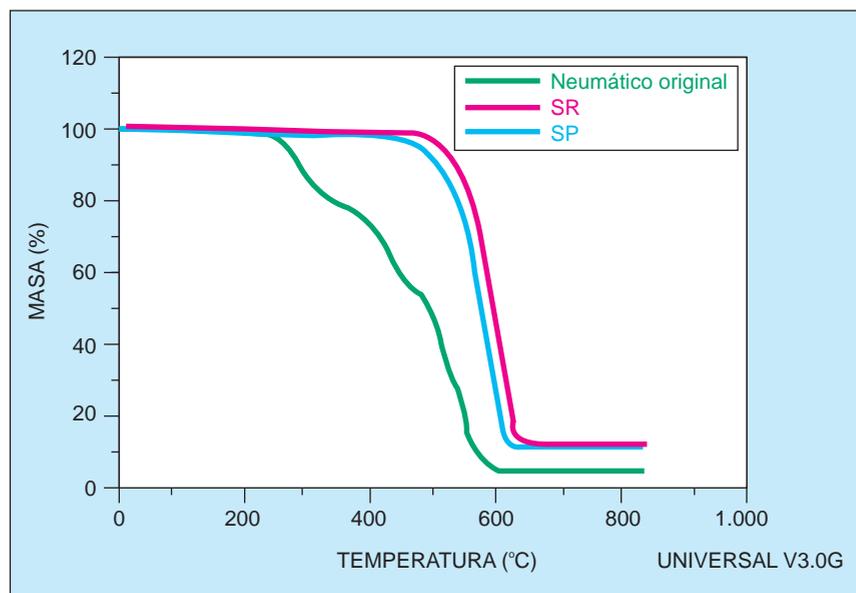
	Reactor laboratorio		Planta Piloto	
	Neumático original	SR	Neumático original	SP
Humedad (%)	1,1	1,0	0,7	1,1
Cenizas (%)	7,1	14,1	8,8	13,6
Volátiles (%)	61,9	1,2	65,3	3,5
Carbono <sup>a</sup> (%)	89,5	95,8	88,6	95,2
Hidrógeno <sup>a</sup> (%)	7,3	0,5	7,5	0,6
Nitrógeno <sup>a</sup> (%)	0,3	0,2	0,7	0,3
Azufre <sup>a</sup> (%)	1,9	3,3	2,3	3,5
Cloro <sup>a</sup> (%)	0,04	0,12	0,06	0,19
Oxígeno <sup>a</sup> (por diferencia)	0,9	0,02	0,7	0,05
P.C.S (MJ/Kg)	37,4	28,6	37,0	28,9

<sup>a</sup> resultados expresados en base seca y exenta de cenizas.

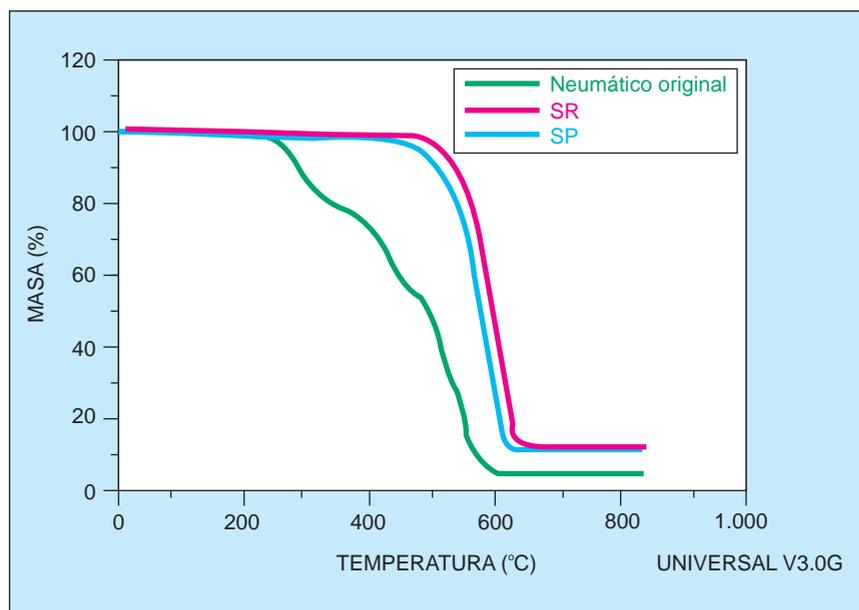
ta piloto (muestra SP) se presenta en la *Tabla 2*. En la misma no se observan diferencias significativas en la composición de las muestras originales ni de las fracciones sólidas obtenidas, hecho que demuestra la similitud de los procesos llevados a cabo en el reactor de laboratorio y en el de la planta piloto. La mayor diferencia afecta al gran contenido en volátiles del neumático original y cómo el proceso los elimina casi en su totalidad. La fracción sólida obtenida tras el proceso es un residuo carbonoso con un poder calorífico elevado que, aunque siendo menor que el del neumático original, es comparable al de un carbón de buena calidad. El proceso concentra ligeramente el azufre en la fracción sólida, mientras el cloro queda retenido casi en su totalidad.

Los resultados del análisis de combustibilidad del neumático original y de las fracciones sólidas obtenidas

**FIGURA 4. TGA del neumático original y de las fracciones sólidas SR y SP.**



**FIGURA 5. DTG del neumático original y de las fracciones sólidas SR y SP.**

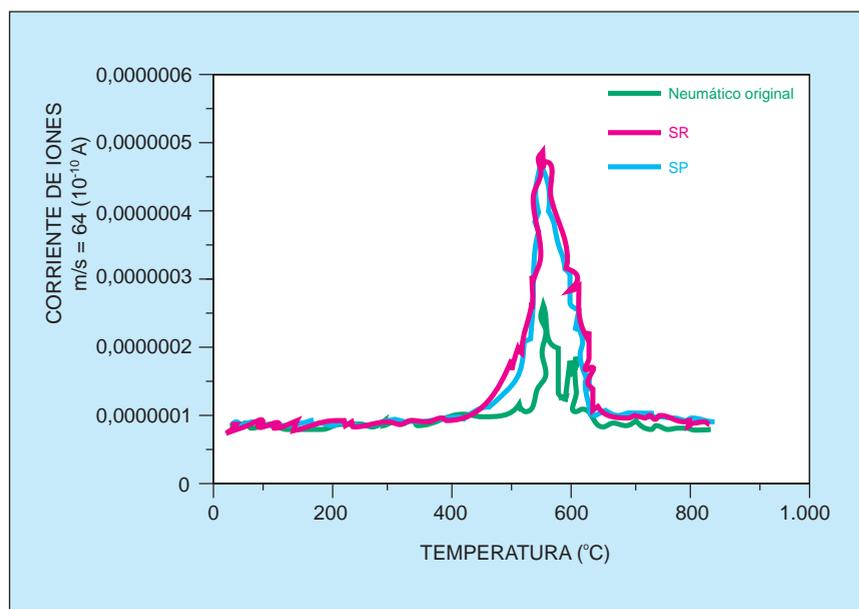


fracciones sólidas separadas son muy parecidas, aunque en la muestra obtenida en el laboratorio su proceso de combustión está ligeramente desplazada (unos 20 °C) hacia mayores temperaturas, debido a su mayor contenido en cenizas y su menor contenido en volátiles.

También se llevó a cabo un seguimiento de las emisiones de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> asociadas a la combustión de las muestras sólidas, mediante un espectrómetro de masas acoplado a la salida de gases del equipo termogravimétrico. Se eligieron estas especies

por ser gases típicos emitidos durante una combustión y por ser conflictivos desde el punto de vista medioambiental, ya que son responsables de la lluvia ácida y el efecto invernadero. En la Figura 6, a modo de ejemplo, se representan las emisiones de SO<sub>2</sub> asociadas a la combustión del neumático original y de las muestras sólidas obtenidas, tanto del laboratorio como de la planta piloto (SR y SP respectivamente). Las emisiones de SO<sub>2</sub> en los dos residuos sólidos son muy similares y mayores que las correspondientes al neumático original, ya que se ha

**FIGURA 6. Emisiones de SO<sub>2</sub> asociadas a la combustión de las muestras sólidas.**



concentrado la materia carbonosa y el azufre en los mismos.

### Fracción líquida

Esta fracción se obtuvo solamente en los ensayos en el reactor de pirólisis del laboratorio (muestra LR) al enfriar los gases producidos. En el reactor de termólisis de la planta piloto las condiciones experimentales del proceso no permiten la obtención de gases, al mantenerse la temperatura a 550°C. Esta fracción, según diversos autores, es una mezcla compleja de compuestos orgánicos de 5 a 20 átomos de carbono y con una gran proporción de compuestos aromáticos. En la Tabla 3 se presentan los resultados correspondientes al análisis elemental y de poder calorífico. Es destacable el elevado poder calorífico, el bajo contenido en azufre y la inapreciable presencia de cloro, otorgando a esta mezcla buenas aptitudes para su

**TABLA 3. Análisis elemental y poder calorífico de la fracción líquida.**

	LR
Carbono <sup>a</sup> (%)	84,9
Hidrógeno <sup>a</sup> (%)	9,6
Nitrógeno <sup>a</sup> (%)	0,4
Azufre <sup>a</sup> (%)	1,6
Cloro <sup>a</sup> (%)	< 0,01
Oxígeno <sup>a</sup> (por diferencia)	3,5
P.C.S. (MJ/Kg)	40,8

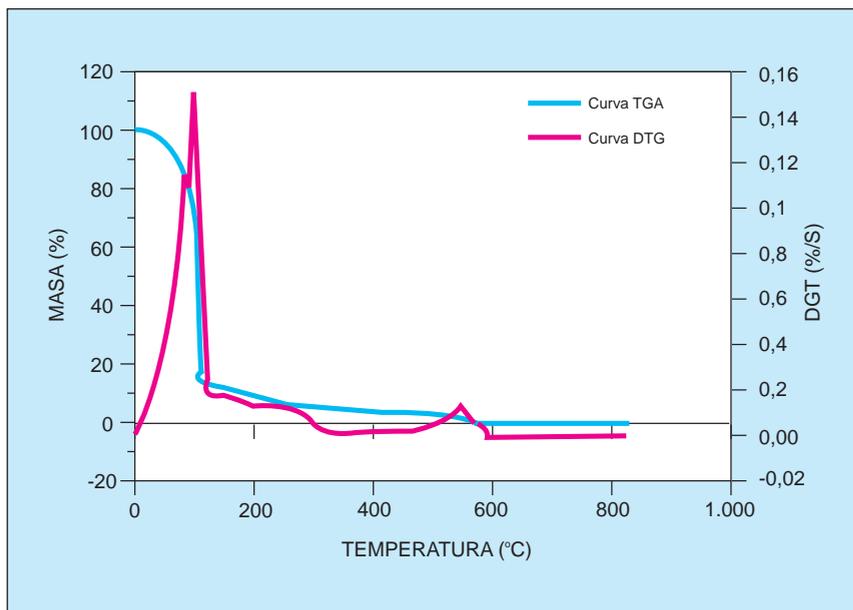
<sup>a</sup> resultados expresados en base seca y libre de cenizas.

aplicación como combustible. Su combustibilidad fue evaluada a través de análisis termogravimétricos. Estos se muestran en la Figura 7, pudiendo destacar la gran pérdida de masa que tiene lugar a bajas temperaturas, debido a la vaporización de los componentes más volátiles de la mezcla, hecho que ha podido demostrarse con el análisis térmico diferencial (DTA), en el que se comprueba la endotermicidad de este proceso, así como con el análisis, por espectrometría de masas, de los gases emitidos.

### Fracción gaseosa

En el ensayo de pirólisis realizado en el laboratorio, se tomaron tres muestras de gases a diferentes temperaturas, para poder hacer una estimación de la composición global de la muestra

**FIGURA 7. Curvas TGA y DTG de la fracción líquida.**



de gases. Así la muestra 350 °C se corresponde con los gases emitidos entre 200 y 350 °C, la muestra 450 °C con los gases emitidos a continuación (entre 350 y 450 °C) y la muestra 550 °C con los gases emitidos al final del proceso (450 y 550 °C). Se eligieron estas temperaturas debido al análisis térmico del proceso de termólisis de neumáticos, donde se observan tres picos (Figura 3). La intención fue separar estos tres picos y conseguir así en cada muestra recogida una composición en los gases más homogénea. En el ensayo de termólisis de la planta piloto se recogieron, a su vez, muestras de gases para el análisis. Los del análisis de cromatografía de gases, con diferentes columnas y detectores, permiten obtener la composición de cada una de las muestras, que se recoge en la *Tabla 4*. En dicha

tabla se muestra también el poder calorífico estimado, en base a su composición, de las diferentes muestras. Éste es acorde con el obtenido por otros autores. Es destacable, a la vista de los resultados, la similitud en la composición de las muestras, sobre todo de la muestra de laboratorio, obtenida a 550°C, con la muestra de la planta piloto, debido a que las altas temperaturas favorecen, a través de reacciones de craqueo, la formación de hidrocarburos ligeros e hidrógeno a expensas de los más pesados.

**POSIBILIDADES DE APLICACIÓN**

Con la entrada en vigor de la nueva normativa se pretende mejorar la deficiente gestión de estos residuos que son desechados, en el mejor de

los casos, en vertederos públicos, y en su mayor parte en incontrolados. Esta mejora de la gestión sin duda supondrá apostar por la valorización de los neumáticos y dentro de ésta, probablemente la valorización energética sufrirá un importante auge. El reciclado de residuos plásticos y cauchos tiene una importancia creciente, debido, por una parte, a la cada vez mayor industria de estos materiales y, por otra, al aumento del costo y la poca aceptación de otros métodos de gestión de estos residuos, como la incineración o el vertido. Además, la mayoría de estos productos se obtienen del petróleo y tienen un alto potencial como fuentes de hidrocarburos. Desde hace unos 25 años, los procesos de pirólisis se han estado desarrollando como nuevos métodos de tratamiento de residuos orgánicos en Japón, Estados Unidos y Alemania. Estos procesos se han centrado en varios materiales, como residuos domésticos, residuos plásticos y de caucho, así como varias clases de biomasa, siendo estos últimos los más desarrollados. Existen numerosas plantas de pirólisis de biomasa repartidas por todo el mundo. Actualmente se están desarrollando plantas de pirólisis de residuos plásticos, principalmente en Alemania y Japón. Estos residuos pueden equipararse a los neumáticos fuera de uso debido a sus características comunes, entre las que se encuentran:

- Elevado número de sustancias que entran a formar parte de su composición, debido a la gran cantidad de aditivos utilizados en los procesos de fabricación de estos productos. En muchas ocasiones estos aditivos son los mismos o muy parecidos, con funciones similares.

**TABLA 4. . Composición, en % en volumen, de las muestras de gases.**

	350 °C (57 % vol.)	450 °C (31 % vol.)	550 °C (12 % vol.)	Muestra global	Planta piloto
Metano	20	24	26	24	27
Etano+Etileno	29	26	20	27	21
Propileno	12	9	6	10	5
Butadieno	3,6	2,7	1,5	3	3
Resto C4	2,1	1,6	1,3	1,8	0,9
C5	3	2	1,1	1,8	1,6
C6	1	0,2	0,1	0,6	0,1
CO	1	1,1	1,6	1,1	2,5
CO2	2,3	1,9	1,4	2,0	6,6
H2	24	30	40	28	30
Otrosa	2,0	1,5	1,0	0,7	2,3
PCS (MJ/m3)	55,0	47,7	40,6	50,8	41,8

<sup>a</sup> resultados expresados en base seca y exenta de cenizas.

– Generalmente, dentro de los residuos plásticos se engloban los cauchos, principal componente de los neumáticos.

– Materiales poliméricos de elevado peso molecular.

– Gran poder calorífico.

Aún teniendo en cuenta estas similitudes el proceso de termólisis para el tratamiento de neumáticos apenas se ha desarrollado, a pesar de que existen numerosos estudios que concluyen en las enormes posibilidades de este proceso para la valorización

energética de este tipo de residuos. Las posibles causas de que este proceso para el tratamiento de NFU's apenas haya crecido podrían ser:

– *El problema de los NFU's es bastante reciente.* La concienciación tanto de las administraciones como de la sociedad del problema de los neumáticos usados como residuo es bastante reciente, al igual que la preocupación por su gestión.

– *Poca aceptación ciudadana.* La aceptación ciudadana ante cualquier instalación industrial dedicada al trata-

miento de residuos es mínima y es todavía menor para este proceso debido a su gran desconocimiento.

– *Pequeña cantidad de neumáticos usados en comparación con otro tipo de residuos.*

– *El propio proceso de pirólisis para el tratamiento de los neumáticos usados ha generado tantos problemas, especialmente debidos a los compuestos líquidos (aceites), que prácticamente ha descartado este proceso en su valorización.*

Existen una serie de características de este proceso de valorización energética (termólisis) de neumáticos fuera de uso que favorecen en gran medida su aplicación industrial:

– *Ausencia de combustión del residuo original.*

– *Aprovechamiento integral del neumático.* Termólisis del neumático, separación de metales y aprovechamiento de subproductos.

– *Mayor rendimiento energético global.* El proceso transforma los principales componentes del neumático en combustibles convencionales.

– *Viabilidad económica.* La capacidad de una planta industrial similar a la planta piloto empleada en el estudio podría ser de 10.000 a 20.000 toneladas/año, consiguiendo una producción eléctrica de 2,5 a 5 MW respectivamente.

– *Gran versatilidad del proceso.* Mediante estudios previos pueden ser reciclados otro tipo de materiales industriales.

Todas estas características convierten a este proceso en uno de los mejores colocados en cuanto a la valorización energética de este tipo de residuos. Este proceso está muy avanzado en la provincia de León, donde incluso se dispone de una planta piloto (utilizada en este trabajo) y en breve se iniciará en León la construcción de una planta industrial.

## CONCLUSIONES

– El proceso de termólisis genera una fracción sólida carbonosa con una excelente combustibilidad y con un elevado poder calorífico, ligeramente inferior al del neumático original pero comparable al carbón de buena calidad, es decir, esta fracción sólida presenta unas excelentes propiedades como combustible, lo que se refleja en su elevado poder calorífico y la ausencia de cloro en su composición. Por su parte el neumático original presenta una combustibilidad defi-



También se utilizan como complementos de seguridad, en los circuitos de alta competición.

ciente caracterizada por las distintas velocidades de pérdida de masa de cada uno de los componentes del propio neumático, así como por el amplio intervalo de temperaturas en el que tiene lugar la combustión del mismo.

– La fracción gaseosa obtenida tras el proceso es una mezcla de gases combustibles (hidrocarburos de bajo peso molecular), CO, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>, junto con una pequeña cantidad de azufre y otros compuestos.

– El proceso de termólisis de neumáticos usados es una técnica muy interesante desde el punto de vista de la generación de nuevos productos (sólidos y gaseosos), con excelentes propiedades como combustibles, lo que facilita en gran medida su valorización energética.

– Este proceso no solamente podría generar una energía englobada dentro de las necesarias Energías Renovables (debido a que supone la valorización energética de un residuo), sino que también podría dar solución a un residuo con un déficit de gestión y con un impacto ambiental superior a cualquier otro tipo de residuo.



La principal aplicación de los neumáticos fuera de uso es su utilización como combustible.

## BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- BRIDGWATER A. V.; GRASSI G. Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilisation. Elsevier Science Publishers LTD (1991).
- ENTE REGIONAL DE LA ENERGÍA DE CASTILLA Y LEÓN. Las Energías Renovables en Castilla y León (1997)
- FUNDACIÓN MAPFRE. ITSEMAP AMBIENTAL. Implicación ambiental de la incineración de los residuos urbanos, hospitalarios e industriales (1994).
- IDAE. Plan de Fomento de las Energías Renovables en España. Madrid. Diciembre 1999.
- JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN. Estrategia Regional de Residuos 2000 – 2010. Documento para el debate.
- MICHELÍN. El neumático y el Medio Ambiente (1998)
- tyres. Journal of Analytical And Applied Pyrolysis 44 (1998) 131 – 152.
- DAI, X.; YIN, X.; WU, C.; ZHANG, W.; CHEN, Y. Pyrolysis of waste tires in a circulating fluidized-bed reactor. Energy 26 (2001) 385 – 399.
- FONT, R.; FULLANA, A.; CONESA, J.A.; LLAVADOR, F. Analysis of the pyrolysis and combustion of different sewage sludges by TG. Journal of Analytical And Applied Pyrolysis 58 – 59 (2001) 927 – 941.
- GONZÁLEZ, J.F.; ENCINAR, J.M.; CANITO, J.L.; RODRÍGUEZ, J.J. Pyrolysis of automobile tyre waste. Influence of operating variables and kinetics study. Journal of Analytical And Applied Pyrolysis 58 – 59 (2001) 667 – 683.
- INGUANZO, M. DOMÍNGUEZ, A.; MENÉNDEZ, J.A.; BLANCO, C.G.; PIS, J.J. On the pyrolysis of sewage sludge: the influence of pyrolysis conditions on solid, liquid and gas fractions. Journal of Analytical And Applied Pyrolysis 63 (2002) 209 – 222.
- LARESGOITI, M.F.; DE MARCO, I.; TORRES, A.; CABALLERO, B.; CABRERO, M.A.; CHOMÓN, M.J. Chromatographic analysis of the gases obtained in tyre pyrolysis. Journal of Analytical And Applied Pyrolysis 55 (2000) 43 – 54.
- DE MARCO, I.; LARESGOITI, M.F.; CABRERO, M.A.; TORRES, A.; CHOMÓN, M.J.; CABALLERO, B. Pyrolysis of scrap tyres. Fuel Processing Technology 72 (2001) 9 – 22.
- MASTRAL, A.M.; CALLEN, M.S.; GARCÍA, T.; NAVARRO, M.V. Improvement of liquids co-al-tire co-thermolysis. Characterization of the obtained oils. Fuel Processing Technology 64 (2000) 135 – 140.
- NAPOLI, A.; SOUDAIS, Y.; LECOMTE, D.; CASTILLO, S. Scrap tyre pyrolysis: Are the effluents valuable products?. Journal of Analytical And Applied Pyrolysis 40 – 41 (1997) 373 – 382.
- M. OTERO, C. Díez, L. F. CALVO, A. MORÁN\*, A. I. GARCÍA. Analysis of the co-combustion of sewage sludge and coal by TG-MS. Biomass and Bioenergy 22 (2002) 319 – 329.
- SENNECA, O.; SALATINO, P.; CHIRONE, R. A fast heating-rate thermogravimetric study of the pyrolysis of scrap tyres. Fuel 78 (1999) 1575 – 1581.
- SHARMA, V.K.; FORTUNA, F.; MINCARINI, M. Disposal of waste tyres for energy recovery and safe environment. Applied Energy 65 (2000) 381 – 394.

*El reciclado de residuos plásticos y cauchos tiene una importancia creciente, debido por una parte, a la cada vez mayor industria de estos materiales y, por otra, al aumento del costo y la poca aceptación de otros métodos de gestión de estos residuos, como la incineración o el vertido.*