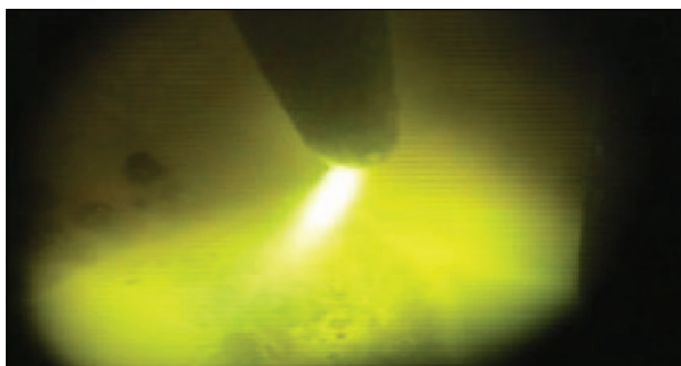


Tratamiento de residuos industriales mediante tecnología de plasma



Juan Carlos Múgica-Iraola *
Francisco Javier Antoñanzas-González*
Lourdes Yurramendi-Sarasaola*

Dr. Ingeniero Químico
Ingeniero Químico
Dra. en Ciencias Químicas

* TECNALIA R&I. Paseo Mikeletegi, 2 - 20009 San Sebastián.
Tfno: 902 760 000. juancarlos.mugica@tecnalia.com ;
javier.antonanzas@tecnalia.com ; lourdes.yurramendi@tecnalia.com

Recibido: 05/07/2010 • Aceptado: 15/10/2010

Industrial wastes treatment using plasma technology

ABSTRACT

- The thermal treatment of waste using plasma technology allows the destruction of organic compounds by pyrolysis or air controlled process, the recycling of valuable metals and the vitrification of the remaining inorganic material. The new vitrified products tapped from the reactor are obtained with a significant volume reduction and with good properties to be reused or stored safely. Plasma torches can use different gases at low flow; consequently, chemical reaction inside the reactor can be controlled, rising high productivity with small equipment. This process aims to be an alternative for materials recycling from waste, allowing an adequate solution to waste treatment problems of industrial countries and achieving an important volume reduction of final waste.
- **Key words:** plasma technology, vitrification of waste, recycling of materials.

RESUMEN

El tratamiento térmico de residuos basado en tecnología de plasma permite la destrucción de productos orgánicos mediante procesos pirolíticos o de gasificación, la recuperación de metales y la vitrificación del material inorgánico restante. Los productos vitrificados resultantes, tras el vaciado del reactor, se caracterizan por una significativa reducción de volumen respecto al residuo original y unas buenas propiedades para su reutilización o almacenamiento. La tecnología de plasma permite el uso de diferentes gases a bajo caudal, en consecuencia, se pueden controlar las reacciones químicas dentro del reactor, alcanzándose productividades altas con equipamientos relativamente pequeños. Este proceso pretende ser una alternativa para el reciclaje de materiales, facilitando una solución a los problemas de tratamiento que se manifiestan en los países industrializados y consiguiéndose además una reducción del volumen de los residuos eliminados.

Palabras Clave: tecnología de plasma, vitrificación de residuos, reciclaje de materiales.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. EL PLASMA: PRESENTACIÓN GENERAL

El plasma se define como un gas ionizado mediante el aporte de energía, que contiene partículas cargadas y neutras con una carga eléctrica global de aproximadamente cero, permitiendo el paso de corriente eléctrica¹⁻⁵. En las antorchas generadoras de plasma térmico, es decir, el que se genera a presión atmosférica, la energía se aporta al gas por diferentes métodos, siendo los principales:

- *Generación de un arco eléctrico entre dos electrodos.* Pueden ser de dos tipos: si la pieza o material a tratar constituye uno de los electrodos se denomina “arco transferido” y en caso contrario “no transferido”.
- *Mediante acoplamiento inductivo.* El gas se hace pasar a través de una bobina de inducción, generándose el plasma.

En muchas aplicaciones industriales, en concreto en las medioambientales, las antorchas más utilizadas son las que generan el plasma mediante arco eléctrico. Además, cuando se trata de fundir un material, el rendimiento que se obtiene con los sistemas transferidos, haciendo

que el material forme parte del circuito eléctrico, es superior a lo de los sistemas no transferidos. En la Fig. 1 se presenta un esquema de antorcha de plasma funcionando en modo transferido.

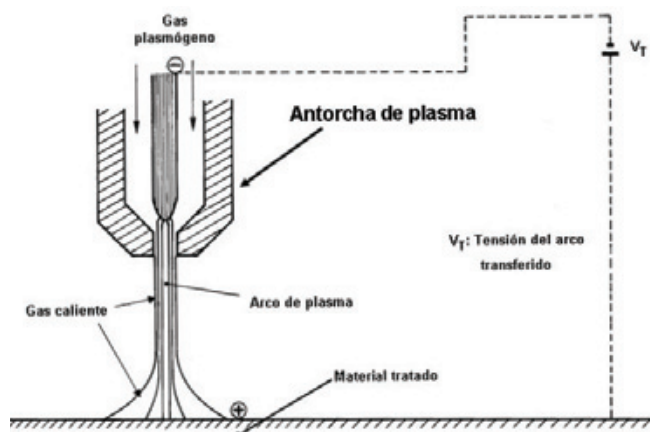


Fig. 1: Esquema de una antorcha de plasma

El gas plasmógeno, denominación que recibe el gas que mediante una excitación externa genera el plasma, puede alcanzar temperaturas muy elevadas en la zona central, por encima de los 10.000 °C, decayendo a medida que avanza hacia la periferia. De esta forma, cuando se utiliza una antorcha en un recinto cerrado como es un horno, se puede compatibilizar la existencia de altas temperaturas puntuales con temperaturas adecuadas al tratamiento de un determinado producto y a la utilización de materiales comerciales para el horno, especialmente el revestimiento refractario.

Las antorchas de plasma se han utilizado en numerosas aplicaciones industriales desde el corte o la soldadura hasta el recubrimiento de superficies, la fusión de metales y, más recientemente, el tratamiento y/o recuperación de residuos industriales. La tecnología de plasma como herramienta para el tratamiento de residuos es de uso reciente. Sin embargo, los resultados obtenidos la sitúan en un lugar preponderante en cuanto a la calidad y seguridad de destrucción de residuos, cuyas principales características son su toxicidad y/o su dificultad de eliminación.

1.2. VENTAJAS DE LA TECNOLOGÍA DE PLASMA

La utilización de la técnica del plasma desde un punto de vista medioambiental presenta una serie de ventajas y propiedades singulares entre las que cabe resaltar las siguientes:

- La generación de calor es independiente de las reacciones químicas implicadas en el tratamiento de los residuos. Se pueden conseguir altas temperaturas de proceso incluso con materiales no combustibles. En los procesos térmicos convencionales el calor desarrollado depende de las reacciones químicas y de los productos involucrados, necesiéndose con frecuencia la adición de combustibles auxiliares.

- El caudal de gas necesario para realizar el aporte de calor puede llegar a ser muy bajo comparado con otros sistemas, minimizando las pérdidas de calor y facilitando su depuración, con el consiguiente ahorro en instalaciones de depuración. El único gas que se aporta es el plasmógeno. Por lo tanto, junto al bajo caudal, hay que resaltar la posibilidad de trabajar en atmósfera controlada incluida la ausencia total de oxígeno. Ambos factores abren posibilidades importantes de control de los productos finales gaseosos con una favorable adecuación al medio ambiente.
- La densidad de energía que se alcanza es muy elevada, consiguiéndose importantes producciones en plantas de reducido tamaño. Es decir, el gas excitado mediante una corriente eléctrica acumula una elevada energía por unidad de volumen que disipa en forma de calor en el interior del horno. Esta ventaja, importante en sí misma, abre la posibilidad también a la fabricación de unidades móviles que realicen el tratamiento de residuos en el mismo lugar donde se han generado.
- Las altas temperaturas alcanzadas permiten que los tiempos medios de residencia puedan ser inferiores a los sistemas convencionales. Por otra parte los productos finales obtenidos, como ya se ha indicado, generan un impacto medioambiental inferior.
- Los productos inorgánicos experimentan una reducción de volumen además de una inertización y, por tanto, una mejor posibilidad de reutilización o deposición en vertedero. La posibilidad de obtener productos finales inertizados por vitrificación completa satisfactoriamente el esquema de tratamiento de una gran variedad de residuos al conseguirse tratar de una forma satisfactoria la materia orgánica por destrucción, la fracción metálica en forma de aleación y la materia inorgánica resultante en forma de material inerte vitrificado. Esta singularidad hace que la tecnología sea apta tanto para el tratamiento integral de los residuos como para el tratamiento final de residuos procedentes de la aplicación de otras tecnologías térmicas más convencionales.
- La versatilidad y facilidad de manipulación de los residuos se ve muy favorecida al no tener que mezclarlos con un producto combustible y al poder trabajar con caudales de alimentación variables en un amplio margen sin alterar las condiciones óptimas de trabajo. La versatilidad también se consigue por la posibilidad de uso de diferentes composiciones de gases plasmógenos lo que permite diseñar y controlar las reacciones químicas que se van a producir.

La tecnología permite, en definitiva, la destrucción en condiciones de atmósfera controlada del producto orgánico que contamina al residuo, la recuperación de los metales con valor comercial presentes^{6,7} y, simultáneamente, la vitrificación del resto de material inorgánico sin un valor económico^{8,9}. Este producto vitrificado tiene unas propiedades frente a la lixiviación superiores a otros tratamientos

convencionales (estabilización con ligantes hidráulicos, etc.) e incluso se puede plantear su reutilización como árido en construcción y obra civil.

1.3. APLICACIONES MEDIOAMBIENTALES

Las aplicaciones medioambientales que se han estudiado son numerosas. Aunque las realizaciones industriales son escasas, cabe resaltar los desarrollos realizados a nivel piloto o demostración para el tratamiento de determinados residuos:

- Eliminación de PCB utilizado como dieléctrico en transformadores eléctricos. En este caso, al tratarse de un líquido, se inyecta el material dentro del haz de plasma para alcanzar una zona de elevada temperatura, difícil de conseguir por otros medios, incrementando sensiblemente la cinética del proceso de destrucción¹⁰.
- Tratamiento de residuos sólidos urbanos con el objetivo de obtener un gas combustible que pueda ser utilizado para la obtención de energía y, por otro lado, un material vítreo inerte¹¹.
- Inertización de las cenizas obtenidas en la de incineración de residuos sólidos urbanos mediante vitrificación¹².
- Tratamiento de los polvos de acería con el objetivo de recuperar el cinc y el plomo en forma metálica y obtener una escoria inerte con el resto de elementos presentes¹².
- Tratamiento de residuos hospitalarios con el objetivo de eliminar la materia orgánica mediante gasificación y obtener un material vitrificado inerte, asegurando que los nuevos productos obtenidos están convenientemente esterilizados¹².
- Tratamiento de residuos nucleares tanto de alta como de media y baja actividad con el objetivo de obtener un confinamiento estable de los elementos radiactivos dentro de la matriz vítrea¹³.

De los procesos desarrollados a nivel piloto, se ha llegado a la escala industrial en el caso de la vitrificación de cenizas de incineración de residuos sólidos urbanos, con varias plantas funcionando en Japón¹⁴. A nivel español también se ha desarrollado, a nivel piloto o demostración, tecnología para aplicaciones medioambientales. La primera consistió en la implantación de una unidad piloto para el tratamiento de polvos de acería, especialmente de fabricación de acero inoxidable¹⁵. Posteriormente, se inició el Programa Plasmatek con varios proyectos relacionados con problemáticas medioambientales, continuando en la actualidad la investigación sobre la vitrificación de residuos de baja y media actividad (RBMA) generados en centrales nucleares^{16, 17}. También es importante subrayar la participación española en la planta demostración de Ottawa (Canadá)¹⁸ para el tratamiento de residuos sólidos urbanos o el proyecto de investigación sobre el tratamiento de cenizas de incineración de residuos sólidos urbanos desarrollado dentro del Programa CENIT¹⁹.

La aplicación comercial de los procesos mencionados se

ve frenada normalmente por el elevado coste asociado a la utilización intensiva de energía eléctrica. Por lo tanto, para que el tratamiento sea viable, resulta importante aminorar otros costes de tal forma que el precio final termine siendo competitivo respecto a los sistemas convencionales. Una de las posibilidades más atractivas consiste en reciclar o reducir el precio de tratamiento de los nuevos productos finales obtenidos. La utilización de la tecnología de plasma para el tratamiento de residuos termina generando, además de una corriente gaseosa, un material vitrificado con unas características sensiblemente mejores que las del residuo original. Por una parte, se obtiene una importante reducción de volumen y, por otra, la matriz vítrea tiene unas buenas propiedades frente a la lixiviación, impidiendo de una forma muy eficaz la migración de elementos, reduciendo su peligrosidad. De esta forma, se puede obtener una reducción del coste convencional de tratamiento a dos niveles:

- Si el destino final siguiera siendo el vertedero, el volumen sería inferior y cabría la posibilidad de ser admitido en un tipo de vertedero diferente a un precio unitario inferior.
- Si el nuevo producto vítreo pudiera ser utilizado en otra aplicación industrial, no sólo se evitaría el coste del vertido sino que sería posible, incluso, obtener algún ingreso por el mismo.

Para potenciar la aplicación de la tecnología a nivel comercial, además de estudiar la viabilidad del proceso, resulta importante considerar el destino final de los nuevos productos o residuos obtenidos. La reciente normativa referente a la admisión de residuos en vertedero permite evaluar experimentalmente la posibilidad de que residuos originalmente considerados peligrosos o con problemas específicos, puedan ser admitidos, tras el tratamiento, en vertederos de residuos no peligrosos, requiriendo un volumen de almacenamiento menor. Este es el objetivo final presentado en el trabajo actual, concretándose en cuatro puntos: estudiar la viabilidad de un proceso de tratamiento mediante tecnología de plasma de un conjunto de residuos, definir la reducción en volumen que se provoca en cada caso, conocer la composición química de los nuevos materiales vítreos y, finalmente, evaluar sus características frente a la lixiviación siguiendo los ensayos normalizados exigidos para ser admitidos en vertedero. En un segundo paso se planteará la continuación del estudio con el objetivo de que el nuevo producto vítreo pueda ser reutilizado en otras aplicaciones industriales, especialmente en construcción y obra civil. No obstante, para este fin, resulta importante que se produzca el necesario desarrollo normativo que lo regule.

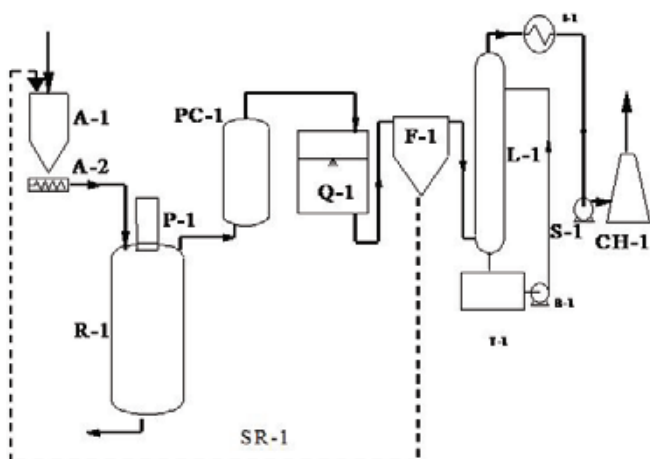
2. METODOLOGÍA

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA PILOTO

La planta piloto utilizada para la parte experimental, ubicada en las instalaciones de *Tecnalia R&I* de San Sebastián, puede tratar residuos diferentes, siempre utilizando

un reactor de plasma como elemento central y unos equipos periféricos que permiten la alimentación de materiales al reactor, la extracción de material fundido y el tratamiento de los gases generados. Esta planta piloto se ha desarrollado y se utiliza exclusivamente para la experimentación relacionada con el tratamiento de residuos industriales, incluidos los residuos nucleares de baja y media actividad. Es una planta modular y versátil que permite alterar su configuración para adaptarla a las características concretas de cada residuo.

A continuación se presenta un esquema de la planta piloto utilizada:



A-1	Dosificadores de residuos y vitrificantes
A-2	Alimentador flexible
R-1	Reactor de plasma
P-1	Antorcha de plasma
PC-1	Postcombustor
Q-1	Enfriador de gases/Quenching Mixto
B-1	Bomba de líquido lavador gases
T-1	Tanque de líquido
L-1	Lavador de gases
I-1	Calefactor de gases
F-1	Filtro de gases
S-1	Soplante
SR-1	Sistema de recirculación
CH-1	Chimenea

Fig. 2: Esquema de la planta piloto

El equipo consta fundamentalmente de un horno de plasma dotado de una antorcha de plasma refrigerada por agua o un electrodo de grafito con sus elementos periféricos correspondientes (fuente de potencia y elementos de control, sistema de refrigeración y alimentación de gas plasmógeno), un sistema de alimentación de residuos al horno (alimentador volumétrico/gravimétrico para residuos sólidos y inyector para líquidos) y un sistema de tratamiento de gases, que incluye un postcombustor, que está diseñado para mantener los gases a 1.200 °C durante un tiempo superior a 2 segundos,

un sistema de enfriamiento rápido ó quenching que enfría los gases hasta 160 °C, un filtro de mangas para retener la materia particular, un lavador de gases para eliminar los gases ácidos procedentes de los compuestos halogenados o derivados del azufre y, por último, un ventilador para aspirar los gases generados y expulsarlos a través de una chimenea.

A continuación se describen las unidades básicas. En función del residuo que se pretenda tratar se ha de elegir el diagrama de proceso apropiado sobre la base de las unidades básicas descritas. El horno de plasma y su antorcha correspondiente forman la parte central de todos los posibles diagramas, por el contrario, las otras unidades pueden ser necesarias o no y el orden en que se coloquen depende del residuo concreto.

- El horno de plasma tiene una potencia máxima de 120 kW. El arco de tipo transferido se establece entre el cátodo y el crisol o entre dos electrodos. La antorcha de plasma está preparada para introducir por su interior el gas plasmógeno (argón), realizándose el movimiento vertical del cátodo por medio de un actuador eléctrico. El alimentador eléctrico suministra a la antorcha corriente continua pudiéndose variar la potencia tanto modificando la intensidad como variando la distancia entre electrodos, lo que hace variar el voltaje. La parte superior y lateral del horno están encamisadas y conectadas a un sistema de refrigeración. En la parte superior del horno se encuentran los orificios para la introducción de la antorcha (central), entrada de alimentación y salida de gases (laterales) y un visor para seguir la marcha del proceso. En su interior, el horno tiene un diámetro de 45 cm y una altura total de 50 cm. Su capacidad de procesamiento es de unos 10 kg/hr cuando el material introducido es totalmente inorgánico y de unos 5 kg/hr cuando se alimenta material orgánico, por la limitación que impone posteriormente el tamaño del postcombustor.

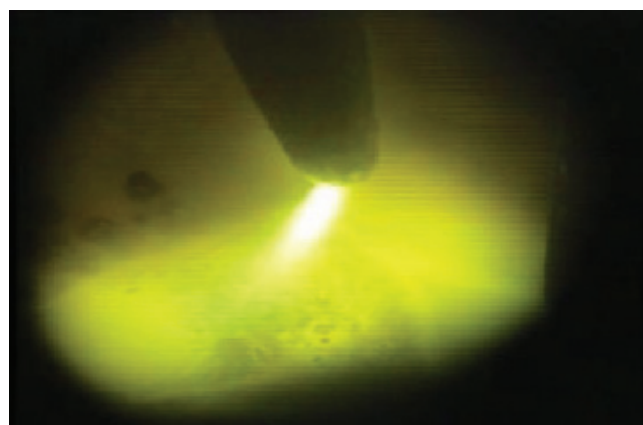


Fig. 3: Haz de plasma en el interior del horno

- Postcombustión de los gases pirolíticos. La salida del reactor plasma se conecta directamente a la

entrada del postcombustor. En el interior de éste se mantiene una temperatura mínima de 1.200 °C con un tiempo de estancia superior a 2 segundos. Asimismo, la concentración de oxígeno a la salida del postcombustor es del 6%. Si el poder calorífico de los gases pirolíticos no es suficiente, la temperatura se mantiene mediante un quemador de gas natural. El volumen de la cámara interna donde se produce la combustión es de 80 l.

- Enfriamiento de los gases. La reducción súbita de temperatura de los gases de salida del postcombustor se logra mediante la inyección de agua nebulizada en la cámara de *quenching*, logrando una temperatura de salida de los gases de 160 °C. De esta forma se evitan posibles recombinaciones de productos orgánicos a la salida y el consiguiente riesgo de formación de productos no deseados. La cámara interna tiene un diámetro de 60 cm y una altura total de 2,5 m.
- Filtro de mangas. Los gases enfriados se pasan por el filtro de mangas para eliminar las partículas en suspensión generadas en el horno tanto por vaporización como por arrastre mecánico. El filtro cuenta con un conjunto de 16 elemento filtrantes de poliéster teflonado en disposición matricial de 4x4, pudiendo alcanzar una temperatura máxima de trabajo de 250 °C. Dispone de un sistema de descolmatación mediante inyección de aire a contracorriente y, en la parte inferior, de un sistema de doble válvula que permite la extracción en continuo de ceniza.
- Lavado de los gases. Esta etapa tiene por objeto la absorción de los gases ácidos generados en el reactor y tiene lugar en una columna de relleno de 60 cm de diámetro y 2 m de altura útil. El gas se trata mediante una disolución a pH controlado a contracorriente que se recircula mediante una bomba. El control del líquido lavador se realiza mediante adición de hidróxido sódico para mantener un pH neutro en la disolución. Posteriormente, los gases son expulsados al exterior mediante un ventilador.
- Control de emisiones a la atmósfera. El conducto de evacuación dispone de un tramo recto sin perturbación del flujo, con las distancias mínimas para el muestreo de las emisiones de partículas sólidas y gases a la atmósfera. Como equipamiento para el muestreo se dispone de una sonda isocinética NAPP (modelo 31) que permite la captación de partículas y gases para su posterior análisis por gravimetría (filtros) y por vía húmeda (soluciones absorbentes). Igualmente, para la determinación de los gases de combustión existe un acondicionador de muestra MADUR (modelo GD10) y un analizador MADUR (modelo GA40 Plus) para la determinación de O₂, CO, CO₂, NO, NO₂ y SO₂.

El COT se mide mediante un analizador FID de la marca BERNATH ATOMIC (modelo 3006).

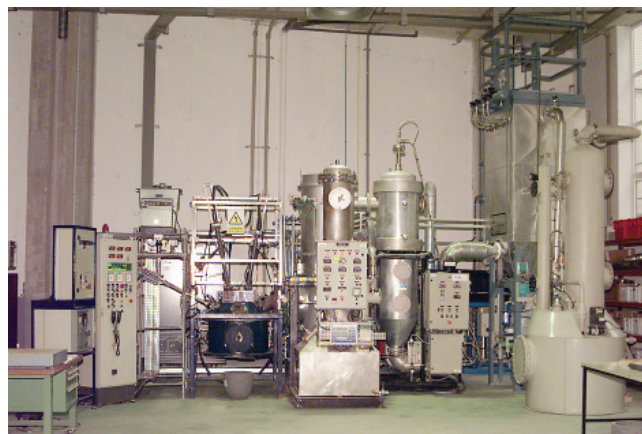


Fig. 4: Planta piloto de tratamiento de residuos mediante plasma

2.2. RESIDUOS ESTUDIADOS

Para demostrar la validez de la tecnología y la calidad final de los productos finales obtenidos, en concreto para ser admitidos en un vertedero de residuos no peligrosos, se han seleccionado diferentes tipos de residuos conteniendo, en diferentes concentraciones, una fracción orgánica y/o una fracción metálica y/o una fracción vitrificable. En trabajos anteriores se había estudiado la validez de la tecnología para el tratamiento de residuos con alto contenido en metales y con una clara finalidad de reciclar los metales de valor, concretamente se experimentó con los catalizadores agotados de la hidrodesulfuración del petróleo²⁰. Los residuos finalmente estudiados se seleccionaron de acuerdo a los siguientes criterios: que no tuvieran elementos de valor comercial, que su destino fuera el vertedero y que presentaran problemas para su deposición. Estos residuos han sido los siguientes:

- Cenizas volantes.

Se han considerado dos tipos de cenizas volantes: las procedentes de centrales térmicas y las generadas en la combustión de los lodos de depuración de aguas. Las cenizas volantes generadas en las centrales térmicas que utilizan carbón como fuente de energía representan un problema no resuelto. Se estima que de las cenizas generadas apenas se utiliza un 10% en diversas aplicaciones. Esta utilización se realiza básicamente en la industria del cemento como material puzolánico de baja granulometría. Por otra parte, su deposición en vertedero presenta problemas de manejo derivados de su tamaño y su baja densidad aparente. Algo similar, aunque se producen en mucha menor cuantía, ocurre con las cenizas recogidas en las incineradoras de los lodos de depuración de las aguas sanitarias residuales. La tecnología de plasma ofrece como alternativa la generación de escorias vitrificadas de características más manejables y químicamente más estables.

- Lodos de pintura.

La industria de transformados metálicos y, muy especialmente, el sector de la automoción e industria auxiliar, generan unos lodos como residuo derivado de los procesos de pintado. Estos residuos se caracterizan por contener componentes orgánicos (restos de disolventes y resinas) que otorgan carácter peligroso al residuo, junto con elementos inorgánicos. La tecnología de plasma puede ser una alternativa que permita la destrucción efectiva desde un punto de vista medioambiental de los primeros, con la posibilidad de aprovechamiento energético, y, por otra parte, consiga inmovilizar los elementos inorgánicos mediante su inclusión en una escoria vitrificada.

- Amianto

Los residuos de amianto provenientes del desguace de ferrocarriles o de instalaciones antiguas que utilizaron este material en el pasado por sus propiedades aislantes, suponen un problema importante por el riesgo para la salud de dicho producto. El plasma ofrece nuevamente la posibilidad de destruir la fracción orgánica que acompaña al amianto residual, plásticos y otros materiales adheridos, y vitrificar la fracción inorgánica. Al vitrificar el amianto, se eliminaría el riesgo asociado a la inhalación de las fibras que desaparecerían completamente generando un material vítreo compacto.

2.3. PARTE EXPERIMENTAL

La parte experimental ha abordado la caracterización de los residuos, la realización de unos ensayos preliminares a escala de laboratorio y, por último, la validación en la planta piloto de plasma junto con la caracterización de los productos resultantes del tratamiento.

Caracterización de los residuos

Tras el muestreo, se han llevado a cabo las tareas de caracterización química de los residuos mediante digestión en medio ácido y análisis elemental ICP/AES. En el caso de las cenizas, adicionalmente se ha procedido a determinar el comportamiento a la lixiviación empleando el ensayo EN 12457 parte 4 (L/S=10) especificado en la Decisión 2003/33/CE, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en vertedero.

Ensayos previos de laboratorio

Se han realizado diversos ensayos a escala de laboratorio para fijar los rangos de estudio en la planta piloto en parámetros como la temperatura de trabajo o la necesidad de adición de reactivos vitrificantes. De esta forma, se han optimizado las variables que afectan al proceso para llevar a cabo las pruebas en la planta piloto de plasma con mayores garantías. Se han realizado los ensayos utilizando un horno Thermolyne modelo 46200 provisto de calentamiento eléctrico mediante elementos calefactores Super Khantal 33 de siliciuro de molibdeno que permite trabajar en atmósfera de argón, simulando las condiciones de operación en el horno de plasma, a temperaturas de hasta 1700 °C.

Con las cenizas volantes se ha trabajado a diferentes temperaturas (1.400, 1.500 y 1.600 °C), con y sin baño metálico en el fondo del crisol (para la recolección de la fracción metálica del residuo) y durante 30 o 60 minutos. Dada la importante proporción de sílice, alúmina y cal de las cenizas se ha estudiado el carácter autovitrificante de las mismas y la posibilidad de utilizarla como reactivo para la vitrificación de otros residuos. En cuanto a los lodos de pintura, se ha seguido una metodología similar a la empleada para las cenizas, incluyendo la determinación de la reducción de peso y volumen de las muestras originales debido a la destrucción de la carga orgánica que contienen. Finalmente, los ensayos realizados con muestras de amianto en el horno de laboratorio han permitido también determinar las temperaturas necesarias para provocar la fusión del material.

Ensayos en planta piloto de plasma

En primer lugar se ha llevado a cabo la puesta en marcha del horno de plasma en las configuraciones necesarias para tratar los diferentes residuos a estudiar. A continuación, se han realizado ensayos con cenizas de central térmica y de incineración de lodos de depuradora alcanzándose en el baño fundido una temperatura de 1450 °C, medida mediante sonda pirométrica en el interior del material fundido. La adición de los residuos se realizó alimentando a un caudal de 2,5 kg/hr durante dos horas. Para retener los elementos presentes en el residuo y que pudieran reducirse a su forma metálica durante el proceso se colocó en frío al principio del ensayo, en el fondo del crisol, 12 kg de cobre. Una vez fundido, el cobre integra en forma de aleación los metales que tras reducción llegan a la parte inferior del horno. La parte de escoria vítrea obtenida, además de analizarse su composición, se ha sometido al ensayo de lixiviación para determinar la migración de diversos elementos al medio lixivante. Las metodologías de caracterización química y de lixiviación son las indicadas anteriormente.

Los lodos de depuradora se secaron previamente debido a su elevada humedad (50-60% en peso). A continuación, se introdujeron dentro de un crisol junto con una barra metálica para poder transferir el arco de plasma. Se realizaron pruebas sin adición y con adición de fundentes para reducir la viscosidad de la escoria resultante. Finalmente, el amianto se trató de una forma similar a la descrita anteriormente a una temperatura de 1400 °C, determinándose la reducción en peso debida a la destrucción del material orgánico, la cantidad de material vítreo obtenido y la de metal fundido procedente de restos metálicos que acompañan al residuo original.

Una vez finalizadas las pruebas en discontinuo y tras la adecuación de la planta piloto de plasma para trabajar en continuo, se han realizado diferentes pruebas de alimentación de residuo a un caudal de 10 kg/hr y de vaciado de material fundido de dos formas diferentes: vertido de la escoria sobre un recipiente de material refractario para su enfriamiento y vertido directamente sobre un fluido refrigerante.



Fig. 5: Vaciado de material fundido y producto final vitrificado

3. RESULTADOS

A continuación se presentan los principales resultados obtenidos tras el tratamiento en la planta piloto de plasma de tres tipologías de residuos estudiadas.

Cenizas volantes

La composición química de las cenizas estudiadas se presenta en la Tabla 1.

	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	P ₂ O ₅ %
Ceniza de central térmica	46	27	8	6	0,8
Ceniza de incineración de lodos de EDAR	28	6	23	16	9

Tabla 1: Composición química de las cenizas estudiadas

Se ha comprobado que los dos tipos de cenizas volantes estudiadas tienen propiedades autovitrificantes. Es decir, vitrifican sin necesidad de adición de fundentes. Basta con fundir el material por la acción de la antorcha de plasma y enfriar.

En la Tabla 2 se presenta la composición química de los elementos mayoritarios correspondientes a los materiales vitrificados obtenidos a partir de las dos cenizas estudiadas.

Es importante señalar que, además de obtener un material de características vítreas, se produjo una importante reducción en volumen: un 76 % en el caso de las cenizas de central térmica y un 82% en las cenizas de incineración de lodo de depuradora. En la Tabla 3 se muestran, para los elementos más significativos, los resultados de los ensayos de lixiviación antes (inicial) y después (vitrificado) del tratamiento, frente a los valores límite para aceptación en vertedero. Para todos los parámetros se evidencia un claro descenso de los valores

	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	P ₂ O ₅ %
Ceniza de central térmica	54	32	1,5	8	-
Ceniza de incineración de lodos de EDAR	41	9	18	25	5

Tabla 2: Composición química del material vitrificado obtenido a partir de las cenizas estudiadas

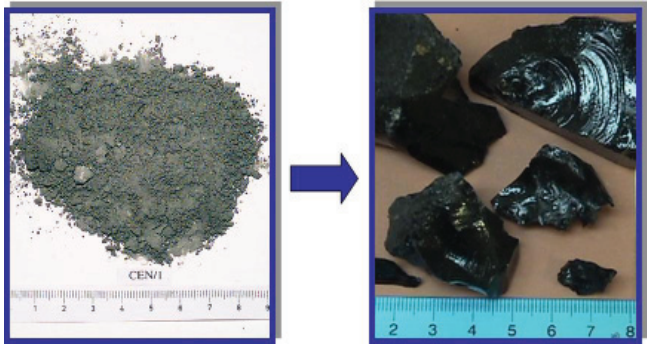


Fig. 6: Ceniza de Central Térmica antes de tratamiento y material vítreo obtenido tras su tratamiento

en el lixiviado, lo que permite validar, para ambos residuos, el proceso de vitrificación como sistema para disminuir la migración de elementos por debajo de los valores exigidos por la legislación para su gestión en vertedero de residuos no peligrosos.

En las experiencias realizadas con cenizas volantes de central térmica se ha efectuado el vaciado del material fundido

de dos formas diferentes. La primera sobre un molde donde se dejaba enfriar obteniendo un vidrio en bloque y, la segunda, sobre un fluido que la enfriaba rápidamente obteniéndose una granalla. Este segundo proceso de enfriamiento da lugar a un material granular que puede ser reutilizado en diferentes aplicaciones con mayor facilidad que el monolítico.

Lodos de pintura

Los lodos de pintura estudiados se caracterizan por tener una importante pérdida en peso cuando se someten a un tratamiento térmico, debido a la presencia de compuestos orgánicos. En ensayo de calcinación en horno mufla de laboratorio a 550 °C esta pérdida es de un 40-50 %. Entre los compuestos orgánicos, cabe destacar la presencia de disolventes de tipo aromático, tales como tolueno y xileno. Estos compuestos son los que fundamentalmente otorgan a los lodos de pintura la clasificación de peligrosos, teniendo

Elemento mg/kg	Límite admisión vertedero		Cenizas			
	No peligrosos	Peligrosos	Central térmica		Incineración lodos EDAR	
			Inicial	Vitrificado	Inicial	Vitrificado
As	2	25	8,6	<1	<1	<1
Cr	10	70	3,9	<0,2	8,1	<0,2
Mo	10	30	3,4	<0,2	1,0	<0,2
Ni	10	40	3,1	<0,2	0,9	<0,2
Pb	10	10	<2	<2	3,0	<2

Tabla 3: Resultados de los ensayos de lixiviación realizados a las cenizas estudiadas y a los materiales vitrificados obtenidos. Comparación con los valores límite permitidos para la gestión en vertedero.



Fig. 7: Material vitrificado granular

asignado en la legislación el código CER080113. Además, el residuo tiene cantidades importantes de cinc (6% ZnO), fósforo (hasta un 24% de P_2O_5 en el caso de lodos procedentes de cataforésis) y titanio (hasta un 25% de TiO_2).

La composición química del material vítreo obtenido se presenta en la Tabla 4.

En este caso la reducción en volumen obtenida es sensiblemente superior respecto al presentado anteriormente para las cenizas debido a la destrucción de la fracción orgánica, llegando a una reducción del 95%. Se ha comprobado la ausencia de disolventes en el material vítreo. Igualmente, en los ensayos de lixiviación sobre la escoria vitrificada, todos los elementos analizados se sitúan por debajo de los límites de aceptación para vertedero de residuos no peligrosos.

	SiO_2 %	Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	CaO %	P_2O_5 %	TiO_2 %	MgO %
Material vitrificado (lodo de pintura)	31	12	6	26	2	17	3

Tabla 4: Composición química del material vitrificado obtenido a partir del lodo de pintura estudiado

	Materia Orgánica %	Carbonatos %	SiO_2 %	Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	CaO %	MgO %
Amianto (crocidolita)	7	11	30	0,8	20	22	3

Tabla 5: Composición química del residuo de amianto estudiado

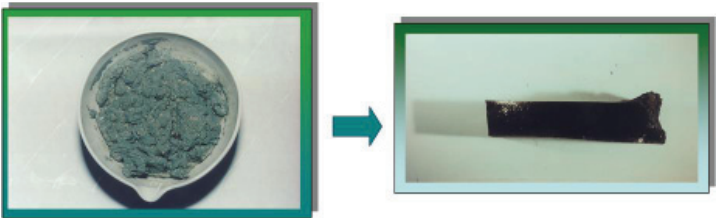


Fig. 8: Lodo de pintura antes de tratamiento y escoria vítreo obtenida tras su tratamiento

Amianto

El residuo de amianto estudiado tiene una problemática muy diferente al resto de residuos. Su composición química, presentada en la Tabla 5, no incluye metales pesados ni productos orgánicos problemáticos, sino que su toxicidad se debe a su estructura fibrosa y al riesgo de provocar cáncer cuando se inhala.

Por lo tanto, su vitrificación significa una solución completa a su problemática. La muestra de amianto, en

concreto crocidolita utilizada en vagones de ferrocarril, se ha sometido a una temperatura de 1.400°C consiguiéndose la fusión del material. Además, se ha obtenido una placa metálica en el fondo del crisol procedente de restos de metal (4% sobre la muestra original) empleados en los marcos y bastidores que sustentan el material en su aplicación aislante. Se ha observado una pérdida en peso del 36% debido en gran parte a los plásticos y materiales orgánicos que acompañan al amianto y al carbonato presente en el material original. Todo ello implica una reducción en volumen considerable, entorno al 95%. La composición química del material obtenido se presenta en la Tabla 6.

Además, en los ensayos de lixiviación practicados sobre el material vítreo, todos los elementos analizados se sitúan por debajo de los límites de aceptación para vertedero de residuos no peligrosos.

	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %
Amianto (crocidolita)	45	2	11	33	5

Tabla 6: Composición química del material vitrificado obtenido a partir del residuo de amianto estudiado

4. CONCLUSIONES

El tratamiento a nivel de planta piloto de diferentes tipologías de residuos industriales mediante la tecnología de plasma ha permitido validar la viabilidad del proceso. Se han tratado residuos con una variada composición demostrándose la viabilidad de realizar simultáneamente tres procesos diferentes: destrucción de la fracción orgánica, recuperación de la fracción metálica y vitrificación del resto de fracción inorgánica. Además, se ha realizado tanto la caracterización química de los nuevos productos vítreos obtenidos como el ensayo de lixiviación para determinar la posibilidad de gestionar los residuos en un vertedero de no peligrosos. En todos los casos se ha demostrado que los nuevos residuos vitrificados son aptos para su admisión es este tipo de vertederos.

En el caso de las cenizas volantes, tanto de central térmica como de incineración de lodos de depuradora, y del amianto residual se ha obtenido un material vítreo sin necesidad de adición de reactivos vitrificantes. Se han producido dos tipos de vidrio: el primero, en bloque, apto para su deposición o almacenamiento, con una reducción en volumen del entorno del 80% para las cenizas y del 95% para el amianto, el segundo, en forma de granalla, adecuado por su formato para su reutilización en aplicaciones constructivas. El tratamiento de lodos de pintura ha permitido validar el proceso simultáneo de destrucción de la fracción orgánica y de vitrificación de la inorgánica con una reducción en volumen del 95%.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Thomson WB. An introduction to plasma physics. Pergamon Press, Oxford, 1962. p.256
- Hollahan J. Techniques and applications of plasma chemistry. Wiley, John & Sons, 1974. 403 p. ISBN: 978-0-4714-0628-0
- Roth J. Industrial plasma engineering. Taylor & Francis, 1995. ISBN: 978-0-7503-0317-0
- Eliezer Y, Eliezer S. The fourth state of matter: an introduction of the physics of plasma. Taylor and Francis, 2001. ISBN: 978-0-7503-0740-6
- Lieberman M, Lichtenberg A. *Principles of plasma discharges and materials processing*. Wiley, John & Sons, 2005. 800 p. ISBN: 978-0-471-72001-0
- Alonso F, Ramirez S, Ancheya J et al. "Alternativas para la recuperación de metales a partir de catalizadores gastados de hidrotratamiento de hidrocarburos pesados: un caso de estudio". *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 2008, Vol. 24-2, p. 55-69
- Sun DD, Tay JH, Cheong HK et al. "Recovery of heavy metals and stabilization of spent hydrotreating catalyst using a glass-ceramic matrix". *Journal of Hazardous Materials*. 2001. Vol. 87, p. 213-223
- Heberlein J, Murphy AB. "Thermal plasma waste treatment". *Journal of Physics D-Applied Physics*. 2008. Vol 41(5), Art No 053001
- Mosse AL, Gorbunov AV, Sauchin W. "Plasma furnaces for toxic waste processing". *High Temperature Material Processes*. 2007. Vol. 11-2, p. 205-217
- Kolaczowski ST, Crittenden BD. Management of hazardous and toxic wastes in the process industries. Routledge (Taylor & Francis Group). , 1987. 663 p. ISBN: 978-1-85166-163-3.
- Leal-Quirós E. "Plasma processing of municipal solid waste". *Brazilian Journal of Physics*. 2004. Vol 34. p 1587-1593.
- Gomez E, Rani DA, Cheeseman CR et al. "Thermal plasma technology for the treatment of wastes: a critical review". *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol 161. p. 614-626
- Barnes C, Cota S, Deckers J et al. Application of thermal technologies for processing of radioactive waste. International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-1527. 2006. 81 p. ISBN: 92-0-113806-7.
- Kolacinski Z, Cedzynska K. "Plasma treatment of inorganic waste". *Environmental Sciences Recherche*. 2005. Vol. 59(3). p. 97-104
- López FA. La investigación siderúrgica en el CENIM. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CSIC). 2008. Disponible en Web: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/19987/1/siderurgia.pdf> (4-oct-2010)
- Múgica JC, Antoñanzas FJ, Vico E et al. "Diseño y construcción de un reactor de tecnología de plasma para el tratamiento de residuos radiactivos". *Estratos*. 2007. Vol 84. p. 10-15
- Múgica JC, Álvarez F, Navarro M et al. Tratamiento de residuos radiactivos mediante tecnología de plasma. *Estratos*. 2001. Vol. 58. p.16-19
- D'Alessio G. Del residuo al recurso: tecnología de plasma. *Ambienta*. 2006. Vol. 61. p.68-69
- Yurramendi L, Múgica JC, Fernández E et al. "Vitrification by plasma treatment: an environmentally sound technology for APC residues" Actas del Congreso REWAS-2008: Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology, (Cancún, México, 12-15 octubre 2008) Vol 1. p.91-96
- Aguirre P, Múgica JC, Vieitez JA "Recuperación de metales mediante tecnología de plasma: Aplicación a los catalizadores agotados de hidrodesulfuración". *Ingeniería Química*. 1997. Vol. 331, p. 109-115