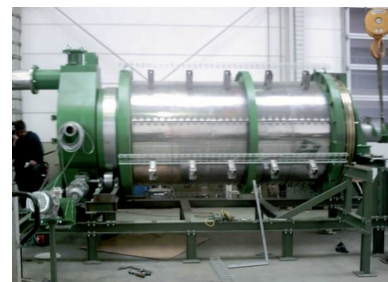


Sistema integral y sostenible para el reciclado y valorización de residuos múltiples – proyecto REVAWASTE

INTEGRAL AND SUSTAINABLE SYSTEM FOR MULTI-WASTE RECYCLING AND VALORISATION – REVAWASTE PROJECT

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6975> | Recibido: 01/10/2013 • Aceptado: 10/02/2013



■■■
Dolores Hidalgo Barrio^{1,2}, Jesús M^a Martín Marroquín^{1,2},
Marta Gómez Rincón¹, Alicia Aguado Pesquera^{1,2} y
Gregorio Antolín Giraldo^{1,2,3}

¹ CARTIF Centro Tecnológico. Parque Tecnológico de Boecillo, 205 - 47151 Boecillo (Valladolid). Tfno: +34 983 546504. dolhid@cartif.es

² ITAP. Universidad de Valladolid. Paseo del Cauce, 59 - 47011 Valladolid.

³ UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. Dpto. de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente. Paseo del Cauce, 59 - 47011 Valladolid.

ABSTRACT

- The general aim of the REVAWASTE Project (LIFE12 ENV/ES/000727) is the sustainable management of a broad spectrum of wastes (industrial waste, non-recyclable fraction proceeding from waste treatment plants and agro-food waste) in an integrated plant. This objective is reached by means of the technological development and practical application of the "Mixed Plant" concept. This development will support a new waste management strategy, based on the separation, pre-treatment, recycling and valorisation steps. In order to valorise in a joint form all the above-mentioned categories of waste, two different processes have been integrated. The first one is an anaerobic digestion system for the transformation of easily biodegradable organic waste into biogas. The second one is a low-temperature pyrolysis (chemical) treatment for the valorisation of the non-recyclable plastic waste fraction. Biogas together with pyrolysis gases (syngas) will be used as fuel in an adapted co-generation engine. As an added value, and in order to close the recycling cycle with a minimum environmental impact, the digestate generated in the anaerobic reactor will be valorised as a slow-release fertiliser (struvite), the solid fraction obtained in the pyrolysis process (ashes) will be transformed into carbon pellets (biofuel) and the liquid fraction obtained during the pyrolysis gas distillation process will be valorise as second generation biofuels.
- **Keywords:** anaerobic digestion, pyrolysis, energy optimisation, integrated system, mixed plant, waste valorisation.

RESUMEN

El objetivo general del proyecto REVAWASTE (LIFE12 ENV/ES/000727) es la gestión sostenible de un amplio espectro de residuos (residuos industriales, la fracción no reciclable procedente de los Centros de Tratamiento de Residuos (CTR) y residuos agro-ganaderos) en una planta integrada. Este objetivo se logra mediante el desarrollo tecnológico y la aplicación práctica del concepto de "Planta Mixta". Tal desarrollo ayudará a llevar a cabo una nueva estrategia de gestión de los residuos, basada en la separación, pre-tratamiento, reciclado y valorización de los mismos. Para la valorización de los residuos se ha integrado un sistema de digestión anaerobia mediante el cual se transforman los residuos orgánicos en biogás, con un sistema de tratamiento termoquímico de la fracción de residuos plásticos no reciclable mediante pirólisis a baja temperatura, obteniéndose syngas. El biogás producido junto con el syngas del proceso de pirólisis, se utilizarán como combustibles en un motor de cogeneración alternativo adaptado. Como valor añadido y para completar el cierre de ciclo con el mínimo impacto ambiental, el digestato producido en la fermentación anaerobia se valorizará como fertilizante de liberación lenta (estruvita), la fracción sólida obtenida en el proceso de pirólisis a baja temperatura (cenizas) se adicionará a pelets de carbón y la fracción líquida procedente de la destilación del gas obtenido en el proceso de pirólisis se valorizará en forma de bio-hidrocarburos de segunda generación.

Palabras clave: digestión anaerobia, pirólisis, optimización energética, sistema integrado, planta mixta, valorización de residuos.

1. INTRODUCCIÓN

El ritmo de vida de la sociedad actual ha aumentado el consumo de recursos, especialmente de aquellos que tienen un corto periodo de vida, lo que ha supuesto un aumento exponencial de la cantidad de residuos en vertedero.

De 2010 a 2011, la producción mundial de plásticos aumentó de 265 a casi 280 Mt, volviendo a la tendencia de crecimiento de la que había gozado el sector desde 1950, que se sitúa en torno a un 9% anual (*Plastics Europe*, 2012). En 2011, Europa consumió 58 Mt, 21% de la producción mundial. Ese mismo año, los residuos post-consumo fueron de 25,1 Mt (con un aumento del 2,4% respecto a 2010), de las cuales, 10,3 Mt millones no se recuperaron y, 14,9 Mt se recuperaron en forma de energía.

En la actualidad la fracción de residuos plásticos que llega a los CTR se somete inicialmente a una etapa de separación, ya que se encuentra mezclada con el resto de residuos. El rechazo de esta etapa es habitualmente enviado a vertedero como destino final, lo que en términos de volumen representa en torno al 65% del volumen total de residuos plásticos de entrada en la planta de tratamiento. Es por su elevado volumen y baja biodegradabilidad por lo que la deposición de los residuos plásticos en vertederos es una práctica que se intenta reducir.

Otra de las vías de salida que se da en la actualidad a estos residuos es la incineración para su eliminación como cenizas (reducción de volumen e inertización), intentando justificar posteriormente un aprovechamiento térmico que compense en parte el alto calor necesario para el proceso, como si de energía “sobrante” se tratara (definiéndolo como una pseudo-valorización energética). Este proceso genera, entre otros efectos nocivos o de sostenibilidad mal interpretada, emisiones de CO₂ que contribuyen al efecto invernadero.

Por otro lado, la intensificación de las explotaciones ganaderas también ha supuesto un incremento de la cantidad de residuos ganaderos generados, los cuales presentan graves problemas ambientales si no se gestionan adecuadamente. Solo en España existen aproximadamente 48 millones de cabezas de ganado (entre porcino y bovino) que representan el 14% de la cabaña de la UE y llegan a generar cerca de 76 Mt de estiércol (IAEST, 2013). La gestión convencional de los residuos ganaderos es la utilización de los mismos como fertilizante en aplicación directa al suelo agrícola. Sin embargo, debido a la concentración y a la situación de las explotaciones, aproximadamente un 30% de los estiércoles generados no disponen de terreno agrícola para su aplicación.

Es por ello habitual la aplicación de los estiércoles de forma inadecuada al suelo agrícola, lo que constituye una fuente de contaminación en las zonas de concentración de explotaciones ganaderas. Por una parte, se producen emisiones a la atmósfera, tanto en forma de óxidos de nitrógeno (NO_x) como de amoníaco. Por otra parte, y más importante, en zonas de concentración de purines, se produce contaminación por nitratos, lo que ha llevado a la declaración de zonas vulnerables a aquellas zonas donde, debido a la elevada concentración de nitratos en aguas subterráneas, se debe limitar la aplicación de productos nitrogenados al suelo.

Para dar solución a los problemas ambientales causados por la inadecuada gestión de los residuos ganaderos y la disposición en vertedero o incineración de los residuos plásticos procedentes de la fracción no reciclable de los CTR, así como de otros residuos industriales no reciclables, se propone la gestión sostenible de los mismos en una planta integrada mediante el desarrollo tecnológico y la aplicación práctica del concepto de “Planta Mixta”. Dicha estrategia de gestión se basa en la separación, pre-tratamiento, reciclado y valorización de estos residuos, de acuerdo con la Directiva 2008/98/CE.

Actualmente, en función del tipo de residuo que se considere (ganaderos, urbanos, industriales, etc.), éstos son gestionados y tratados en centros o plantas específicas para cada caso desaprovechando sinergias entre tratamientos. En este sentido, el aspecto más innovador que plantea este trabajo es la gestión sostenible de un amplio espectro de residuos en una

misma instalación, una “Planta Mixta”, que incluye en su diseño la identificación de fuentes y sumideros de energía, con objeto de cubrir las necesidades energéticas de unas etapas con la energía generada en otras, y así conseguir un equilibrio energético óptimo del sistema global. Esto último no se consigue cuando los diferentes residuos son tratados en plantas independientes, como viene ocurriendo habitualmente.

Mediante el proyecto REVAWASTE se ha buscado dar solución a los problemas ambientales que generan la eliminación de residuos en vertedero y la inadecuada gestión de los residuos ganaderos, valorizándolos mediante procesos amigables con el medio ambiente.

2. MATERIALES Y METODOS

Se ha planteado el desarrollo tecnológico del concepto de “Planta Mixta”, que propone el tratamiento y valorización de residuos agro-ganaderos, industriales y la fracción no reciclable de los residuos urbanos en la misma instalación. Para la valorización de los residuos se ha propuesto la integración de un sistema de digestión anaerobia mediante el cual se transforman los residuos orgánicos fácilmente biodegradables en biogás, y un sistema de tratamiento termoquímico de la fracción no reciclable de los residuos mediante pirólisis a baja temperatura. El biogás producido junto con el *syngas* del proceso de pirólisis se utilizan como combustibles en un motor de cogeneración alternativo adaptado, generando energía eléctrica y térmica (cogeneración) que será utilizada en el proceso global, haciendo que este necesite un menor aporte energético.

Además, para completar el ciclo cerrado con el mínimo impacto ambiental, se incluye la valorización de los residuos generados en el proceso de digestión y pirólisis como productos de alto valor añadido amigables con el medio ambiente. Dichos productos son: fertilizantes de liberación lenta, biohidrocarburos de segunda generación y pelets de carbón. El aprovechamiento de estos sub-productos y su uso directo va, además, a permitir preservar otros recursos naturales. Finalmente, se buscará la reutilización del agua/fracción líquida generada en el proceso para consumos viables en la planta y sus alrededores (limpieza de granjas, riego de cultivos, etc.).

2.1. PLANTA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EN DOS FASES

En una primera etapa, y con objeto de estudiar las características operacionales y las ventajas de la digestión anaerobia en dos fases (2F) frente a la digestión anaerobia tradicional (1F) se construyeron dos reactores a escala de laboratorio (Figura 1).

Cada sistema consistió en un reactor de vidrio con puntos de toma de muestra en los laterales y una abertura superior para introducir la alimentación y realizar la recogida del biogás en una bolsa *Tedlar*. El volumen efectivo fue de 5,0 L en el sistema 1F y de 1,0 y 4,5 L respectivamente, para las etapas de acidogénesis y metanogénesis en el sistema 2F. Típicamente, en un sistema 2F el reactor acidogénico es mucho menor en tamaño que el metanogénico, dado que el tiempo hidráulico de residencia (THR) para la acidogénesis es menor que para la metanogénesis (Wust, 2003). La temperatura fue controlada a 35± 1 °C en una cámara termostataada y los reactores fueron agitados de forma continua en una mesa agitadora.

Como se observa en la Fig.1 en el caso del sistema 2F la alimentación entra al reactor acidogénico y el efluente de ese primer reactor es el que alimenta el segundo reactor o reactor metanogénico.

Los sistemas 1F y 2F empleados en este estudio fueron alimentados con el mismo influente (una mezcla de residuos alimentarios y purín porcino) y operaron en paralelo para analizar cuantitativamente el efecto de la separación de fases en el tratamiento anaerobio.

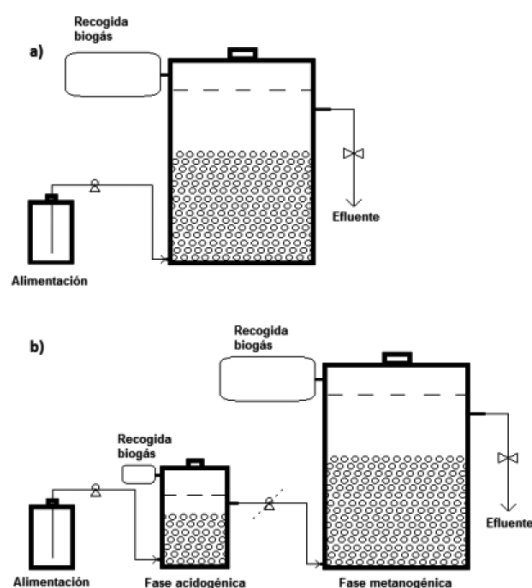


Fig. 1: Instalación experimental de digestión anaerobia: a) sistema 1F; b) sistema 2F

Posteriormente se construyó una instalación piloto de digestión anaerobia en dos fases (Figura 2). Dicha planta se compone de una unidad de trituración, un tanque de homogeneización (0,5 m³), un reactor de acidificación con agitación de velocidad variable (450 mm diámetro interno y 700 mm altura, fabricado en acero inoxidable con un volumen de trabajo de 0,1 m³), un reactor de metanogénesis también dotado de agitación con velocidad variable (800 mm diámetro interno y 1.200 mm altura, fabricado en acero inoxidable con un volumen de trabajo de 0,5 m³) y un tanque para el efluente digerido. Los reactores acidogénico y metanogénico fueron contruidos con una relación de volúmenes 1:5 para mantener menores THR en el reactor metanogénico. Los materiales de entrada eran pretratados en el triturador, bombeados al reactor de acidificación y de ahí bombeados al reactor metanogénico. Sendos termómetros y pH-metros fueron instalados en los reactores de acidogénesis y metanogénesis. Un sistema de presión fue instalado en la línea del biogás para monitorear la presión en cabeza de ambos reactores. El biogás generado en ambos equipos fue medido mediante sendos gasómetros. El exterior de ambos reactores se recubrió de una capa de espuma de poliuretano de 5 mm de espesor para aislarlos térmicamente y la temperatura fue mantenida a 35±1 °C mediante resistencias eléctricas encamisadas. Varios puertos fueron instalados en las paredes del sistema de fermentación para toma de muestras.



Fig. 2: Planta de digestión anaerobia en dos fases

2.2. PLANTA DE PIRÓLISIS-TORREFACCIÓN A BAJA TEMPERATURA

El sistema desarrollado de pirólisis catalítica a baja temperatura (torrefacción) está formado básicamente por un bloque principal de tratamiento térmico en condiciones controladas (Figura 3). La degradación catalítica de la fracción no reciclable de los CTR permite direccionar el craqueo molecular maximizando, en este caso, la fracción gaseosa. Este nuevo diseño de pirolizador (propiedad de la empresa InfinitVE) permite trabajar a temperaturas inferiores que los sistemas tradicionales manteniendo altas velocidades de reacción, lo que reduce los costes del proceso.

El proceso que tiene lugar consiste en la descomposición química por degradación térmica catalizada en ausencia de oxígeno de una mezcla de materiales plásticos y otros compuestos no reciclables procedentes de CTR y de la industria en general. Todos los residuos de entrada que llegan a la planta son mezclados sin importar, en principio, su naturaleza, dado que el proceso es el mismo para todos, y son introducidos para su tratamiento en la cámara cilíndrica (horno de reacción). En dicha cámara la mezcla de alimentación es sometida a temperaturas en torno a los 400-500°C, y el gas generado, syngas, se condensa en un proceso de dos etapas con el fin de alcanzar un destilado de hidrocarburos y un gas rico en metano. La fracción sólida o char es recogida aparte para su posterior valorización agronómica o energética.



Fig. 3: Reactor de pirólisis-torrefacción (Fuente: InfinitVE)

2.3. ENSAYOS DE CRISTALIZACIÓN

La valorización del digestato generado en la planta piloto de digestión anaerobia en dos fases se ha realizado mediante un proceso de cristalización como estruvita. Dicho proceso consiste en la co-precipitación del nitrógeno amoniacal y fósforo ortofosfórico contenido en el digestato mediante la adición de óxido de magnesio, formando una sal llamada estruvita (fosfato amónico magnésico hexahidratado), valorizable en la formulación de fertilizantes minerales (Fig. 4).

Los tipos de reactor más empleados en la cristalización de estruvita son el de lecho fluidizado (Bowers y Westerman, 2005) y las columnas agitadas con aire (Münch y Barr, 2001), pero en este caso se ha optado por un reactor de tanque agitado por su mayor flexibilidad y facilidad en el manejo siendo, ade-



Fig. 4: Estruvita seca obtenida a partir de digestato

más, el tipo de reactor que más se emplea en la cristalización industrial.

2.4. INTEGRACIÓN DE PROCESOS

En el conjunto de procesos que conforman la “Planta Mixta” se tienen corrientes a diferentes temperaturas así como fuentes y sumideros energéticos y de materiales. La integración busca conseguir una operación energéticamente eficiente mediante el aprovechamiento de la energía remanente en las corrientes calientes del proceso para precalentar o calentar las corrientes frías del mismo, logrando así una reducción de costes principalmente en cuanto al uso de energía eléctrica y combustibles (Kemp, 2007).

A la hora de plantearse la integración energética, lo primero que hay que hacer es cuantificar la energía disponible en corrientes y efluentes. Para ello se debe proceder a un exhaustivo diseño y definición de bloques y elementos funcionales presentes en la planta (Figura 5). En cada uno de ellos se ha de plantear el balance individual de masas, de flujos y temperaturas, así como los consumos eléctricos estimados, máximos y mínimos. Con ello se obtiene una fotografía global de la planta que permitirá identificar las fuentes y sumideros energéticos y de materiales.

El objetivo final es organizar el sistema de transmisión energética y de materiales para reducir las pérdidas del sistema, así como potenciar el intercambio de calor y frío (energía térmica) entre elementos clave de la planta.

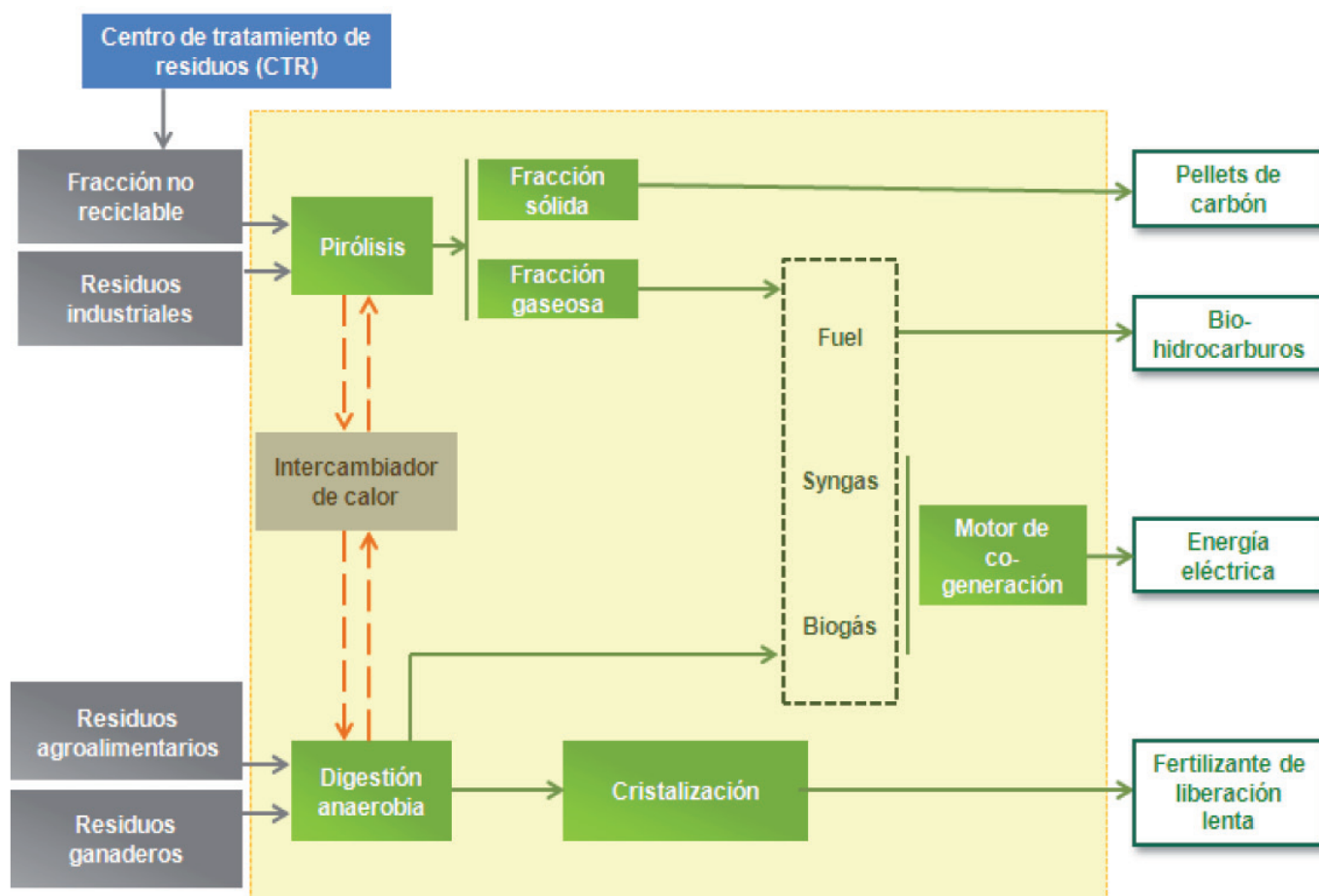


Fig. 5: Diagrama de proceso con integración de flujos energéticos y másicos

3. RESULTADOS

3.1. BIOMETANIZACIÓN DE RESIDUOS AGROALIMENTARIOS Y GANADEROS

El comportamiento de la digestión en una y dos fases de una mezcla de residuos agroalimentarios y ganaderos fue comparado a escala laboratorio en términos de estabilidad, producción de metano y capacidad de tratamiento.

Aun manteniendo condiciones de pH, THR y velocidad de carga orgánica (VCO) similares en ambos sistemas, el sistema 2F parece proporcionar un efluente de mejor calidad en términos de eliminación de sólidos volátiles (SV), mayor estabilidad a corto y largo plazo y mayores rendimientos de generación de metano que el sistema 1F (Figura 6).

Ambos sistemas consiguieron una más que aceptable eficiencia de eliminación de SV (superiores al 70%) operando en estado estacionario, pero cuando se producía una sobrecarga de alimentación en los sistemas, el reactor 1F mostraba poca estabilidad, mientras que el reactor 2F se recuperaba rápidamente de dichas sobrecargas. Este hecho ya fue observado por Solera et al. (2002) quien concluyó que el sistema 2F aumenta la estabilidad del proceso controlando la fase de acidificación, lo que permite evitar alteraciones en la fase metanogénica, siempre más sensible a cambios bruscos.

Adicionalmente, el sistema 2F fue capaz de operar a VCO de 3,1 kgSV/m³d de forma estable, mientras que el reactor 1F no superó 2,6 kgSV/m³d de carga orgánica. Mayor VCO im-

	% N	% C	% H	% S	% O	%Cenizas
Residuo 1	1,51	35,79	5,20	0,16	27,11	30,23
Residuo 2	1,12	41,57	6,59	0,15	32,79	17,78

Tabla 1: Composición elemental.
Fuente: InfinitVE

plica mayor capacidad de tratamiento para el mismo volumen de digestor, lo que resulta económicamente más beneficioso.

Comparando la producción de metano en ambos sistemas (Figura 6c y 6d) se puede concluir que el sistema 1F generalmente produce más biogás, pero el sistema 2F produce un biogás con mayor contenido en metano (67% frente al 65% del sistema 1F), por lo que en términos de producción de energía, el sistema 2F es también más ventajoso.

Como consecuencia, y basándose en los datos del estudio, puede decirse que el sistema 2F consigue, en general, mejores resultados que el sistema 1F en el tratamiento de residuos agroalimentarios y ganaderos.

En la operación de la planta piloto con la misma mezcla de residuos se consiguieron resultados incluso mejores que en laboratorio. La eliminación de SV alcanzó el 81,9% trabajando con 20 días de THR. En estas condiciones la producción máxima de biogás fue de 0,65 m³ kg/SV disuelto con un contenido en metano del 65%.

	100 °C	150 °C	200 °C	300 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1.000°C
Residuo 1	5,79	6,64	9,41	25,35	35,92	43,19	45,34	48,87
Residuo 2	4,43	5,24	8,47	-	73,99	83,31	85,07	90,10

Tabla 2: Análisis termogravimétrico. Pérdida de peso (%).
Fuente: InfinitVE

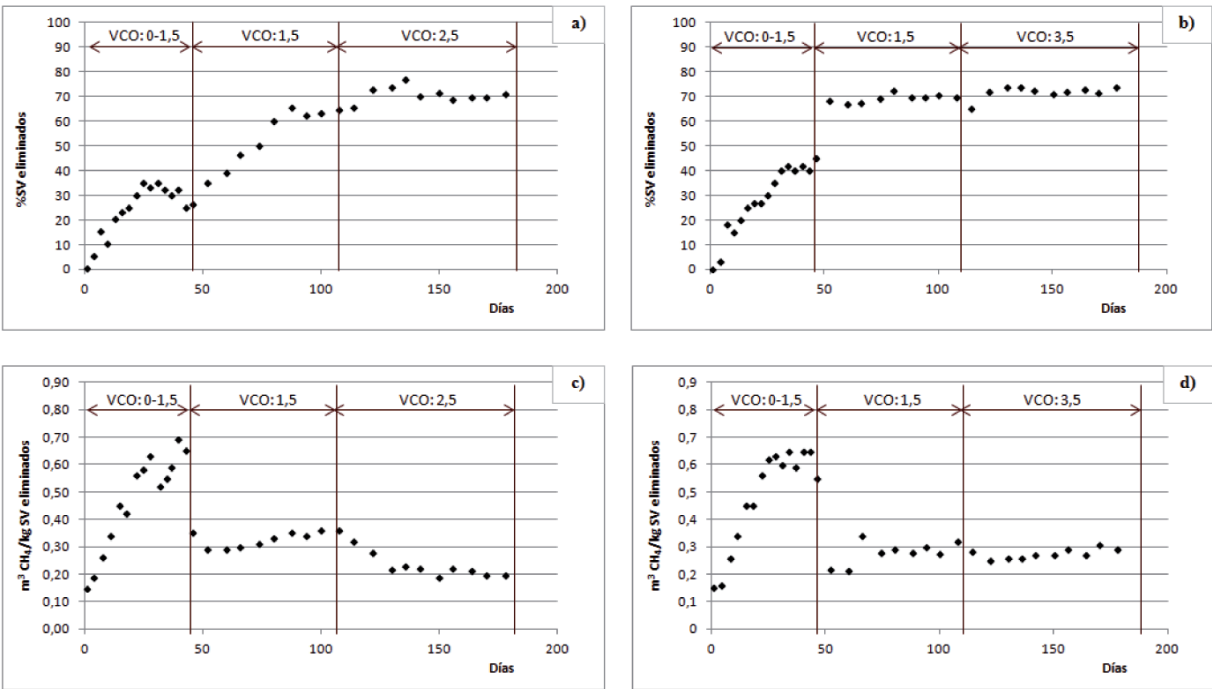


Fig. 6: Evolución comparativa de los digestores de laboratorio en una (a, c) y dos fases (b, d). VCO: kg SV/m³d

3.2. PIROLÍISIS DEL RECHAZO DE LOS CTR Y RESIDUOS PLÁSTICOS

Se han testado dos productos en la planta de pirólisis, el Residuo 1, un mix de Ecoparc con triaje de baja eficiencia, compuesto en diferentes proporciones por una mezcla de orgánicos, inertes y plásticos no reciclables y el Residuo 2, o residuo industrial plástico no reciclable con pequeñas trazas de otros residuos. Ambos muestran un balance compositivo muy similar frente al carbono (C), nitrógeno (N), hidrógeno (H), azufre (S) y oxígeno (O), como puede observarse en la Tabla 1.

Aunque la composición analizada es similar, el Residuo 2 presenta un mayor rendimiento pirolítico que el Residuo 1, pues contiene una mayor proporción de carbono (C) y de hidrógeno (H) y, por tanto, tiene un mayor PCI (poder calorífico inferior). A todos los efectos, tener más carbono implica una mayor posibilidad de obtener productos gaseosos de mayor valor añadido (mayor valor energético).

El análisis termogravimétrico (valoración de cómo disminuye el peso en función de la temperatura aplicada durante aproximadamente una hora), proporciona los valores recogidos en la Tabla 2, teniendo presente que el material remanente a 1.000 °C para los residuos testados indica cenizas.

Se pueden apreciar grandes diferencias entre ambos residuos. Mientras que a 100 °C la humedad de los dos productos es totalmente similar, a 400 °C se ha producido un 73,99% de gases para el Residuo 2 mientras que en el caso del Residuo 1 no llega ni a la mitad de este valor, corroborando que a menor carbono menor es la cantidad de producto gaseoso de interés. Pero la mayor diferencia es que el Residuo 1 tiene una elevada cantidad de cenizas, más de cuatro veces las cenizas obtenidas con el Residuo 2. Este hecho es de nuevo indicativo de una menor proporción de volátiles o gases al tratar el Residuo 1, corroborando lo dicho anteriormente respecto a rendimientos de operación con ambas corrientes.

Por tanto, en el tratamiento del Residuo 1 se espera la formación de un porcentaje de gas no superior al 60% en el mejor de los casos, mientras que en el caso del Residuo 2 se espera conseguir hasta un 90%. Este factor tiene una enorme repercusión económica, pues por un lado al tratar el Residuo 1 se generan más cenizas (fracción no aprovechable energéticamente, aunque puede que sí agrónicamente, todo dependerá de su contenido en metales) a la vez que menos fracción gas (la que realmente interesa en este caso).

Desde el punto de vista del proceso en sí, el estudio arroja como conclusión que si se controlan las propiedades del catalizador empleado, es posible disminuir la energía necesaria para la degradación térmica de los residuos y optimizar así el craqueo de las cadenas poliméricas en forma controlada, obteniéndose compuestos gaseosos de alto valor añadido.

3.3. APROVECHAMIENTO AGRÍCOLA DEL DIGESTATO

La composición del digestato generado en la planta piloto de digestión anaerobia en dos fases se muestra en la Tabla 3. Para alcanzar las relaciones molares necesarias para producir la precipitación de la estruvita (fórmula química $(\text{NH}_4)\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) se añadieron las siguientes sales $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en la proporción demandada por la estequiometría.

Ca^{2+} (mg/L)	86,00
Mg^{2+} (mg/L)	9,19
K^+ (mg/L)	436,20
Na^{2+} (mg/L)	242,50
PO_4^{3-} (mg/L)	5,94
N-NH_4 (mg/L)	879,00
CO_3 (meq/L)	3,80
HCO_3 (meq/L)	69,50

Tabla 3: Composición del digestato

La reacción de cristalización de estruvita depende de varios factores, siendo el pH uno de los más influyentes. Para evaluar su efecto se llevaron a cabo varios experimentos en un intervalo de pH comprendido entre 8,5 y 11,5. Para ajustar el pH se utilizó NaOH 1 M.

La eliminación del nitrógeno y fósforo presentes en el digestato fue máxima a pH 10,5. En estas condiciones, cerca del 90% de estos elementos precipitaron como cristales estruvita (Figura 7).

Para estudiar el efecto de ión magnesio (Mg^{2+}) en la cristalización de estruvita, se analizaron relaciones molares de Mg/P comprendidas entre 1 y 1,9 mediante la adición de $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ al medio. Manteniendo un pH de 10,5 se observa que el porcentaje de eliminación de fósforo aumenta al hacerlo la relación Mg/P hasta un máximo de 95,02% con una relación Mg/P = 1,4. A partir de este momento, aunque la relación Mg/P aumente, no se consigue retirar más fósforo del medio.

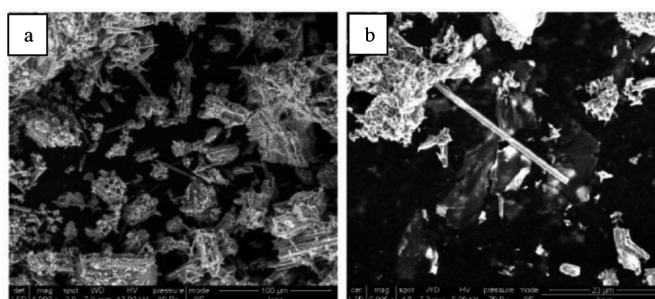


Fig. 7: Cristales de estruvita: a) 1000x; b) 5000x

En el proceso de cristalización de la estruvita, la presencia del ión calcio (Ca^{2+}) influye debido a la competencia que genera este ión por su tendencia a formar un precipitado de fosfato de calcio. Durante la experimentación se observó que a pH 10,5 con el incremento de la relación molar de Ca/Mg, aumentaba el porcentaje de eliminación de magnesio y calcio mientras que la cantidad de fósforo precipitado se mantenía constante, por lo que se deduce que a este valor de pH su recuperación sería la misma independientemente del calcio presente.

4. CONCLUSIONES

El estudio realizado arroja como conclusión general que es posible realizar, desde el punto de vista técnico y económico, el tratamiento integral de múltiples residuos en una única Planta Mixta, mediante la selección de las tecnologías más adecuadas en cada caso y la integración energética y material de los sistemas.

Se ha propuesto una alternativa innovadora para el tratamiento de la fracción de plásticos no reciclable que va a vertereder como es el reciclado químico mediante pirólisis a baja temperatura en un reactor catalizado de diseño novedoso. Esta tecnología, además de operar más eficientemente que la mayoría de los sistemas actualmente existentes en el mercado, genera dos ventajas ambientales adicionales: por un lado se evita la deposición de residuos plásticos en vertedero, por lo que se reducen de forma considerable las emisiones perjudiciales a la atmósfera y, por otro lado, se generan productos combustibles a partir de residuos.

Se propone además la integración en una única instalación, la Planta Mixta, del sistema de pirólisis con un sistema de digestión anaerobia 2F que ha demostrado su mayor eficacia en el tratamiento de residuos orgánicos frente a los tradicionales sistemas 1F. Ambos bloques, pirolizador y biodigestor, se retroalimentan entre sí para evitar insumos externos de energía y otros recursos necesarios. Para completar el ciclo cerrado con el mínimo impacto ambiental, los residuos generados durante los procesos serán valorizados como productos de alto valor añadido: pelets de carbón (biocombustible sólido), bio-hidrocarburos de segunda generación y fertilizantes de liberación lenta.

En resumen, basándose en los logros alcanzados con la experimentación realizada, se prevén alcanzar los siguientes resultados con la planta en pleno funcionamiento:

- Ahorro de un 80% de los costes de generación térmica y eléctrica en comparación con una planta de bio-digestión tradicional que opere de forma autónoma.
- Ahorro de un 15% de los costes de generación térmica y eléctrica en comparación con una planta de pirólisis de residuos plásticos no reciclables tradicional que opere de forma autónoma.
- Valorización del 100% del digerido producido en el proceso anaerobio como un fertilizante de liberación lenta, el cual ofrece como ventajas la reducción de la toxicidad a las plantas y de las pérdidas de nitrógeno al suelo.
- Reducción entre un 65% y un 80% el impacto ambiental asociado a la deposición en vertederos de la fracción no reciclable procedente de los CTR.
- Obtención de rendimientos de eliminación de sólidos volátiles de al menos un 90%.
- Obtención de rendimientos de recuperación del nitrógeno contenido en el digestato en forma de estruvita del 95-98%.
- Obtención de rendimientos de fase líquida, sólida y gas en el proceso de pirólisis-torrefacción en torno a 7%, 3% y 90%, respectivamente.
- Valorización del 100% de los subproductos generados en el proceso de pirólisis-torrefacción como pelets de carbón, syngas y bio-hidrocarburos.

En la actualidad, y en el marco del proyecto

LIFE REVAWASTE, se está planificando la construcción de la primera planta Mixta en España para el tratamiento de 1t/h de residuos.

NOMENCLATURAS

- 1F: Digestión anaerobia tradicional (una fase)
- 2F: Digestión anaerobia en dos fases
- CTR: Centro de Tratamiento de Residuos
- SV: Sólidos Volátiles
- THR: Tiempo Hidráulico de Residencia
- VCO: Velocidad de carga orgánica

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la financiación recibida de la Comisión Europea a través de su programa LIFE+ para la realización de este trabajo (proyecto LIFE 12 ENV/E/000727-REVAWASTE).

BIBLIOGRAFÍA

- Bowers KE, Westerman PW. "Design of cone-shaped fluidized bed struvite crystallizers for phosphorus removal from wastewater". Transactions of the ASAE. 2005. Vol. 48(3) p.1217- 1226.
- IAEST - Instituto Aragonés de Estadística. "Información estadística del sector agrario". Junio 2013.
- Kemp I. Pinch analysis and process integration. 2^o edición. Oxford. Ediciones BH, 2012. ISBN 13: 978-0-75068-260-2.
- Münch EV, Barr K. "Controlled struvite crystallization for removing phosphorus from anaerobic digester sidestreams". Water Research. 2001. Vol. 35 p.151-159. (DOI:10.1016/S0043-1354(00)00236-0).
- Plastics Europe. "Plásticos-Situación en 2011" [en línea]. http://www.plasticseurope.org/documents/document/20111107102611-pe_factsfigures_es_2011_lr_final041111.pdf [consulta: septiembre 2013].
- Solera R, Romero LI, Sales D. "The evolution of biomass in a two-phase anaerobic treatment process during start-up". Chem Biochem Eng Q. 2002. Vol. 16(1) p.25-29.
- Wust E. "Single-phase and two-phase cheese wastewater treatment by anaerobic SBRs". PhD thesis, Civil, Construction and Environmental Engineering Department, Marquette University, Milwaukee, Wisconsin. 2003.