



Secado y aprovechamiento energético de fangos de EDAR

Xavier Elias Doctor ingeniero industrial y director de la Bolsa de Subproductos de Cataluña

La gestión de los fangos de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) repercute cada día en mayor medida en sus costes de explotación, por lo que su proceso de tratamiento puede seguir dos vías alternativas: la digestión anaerobia; y el secado con posterior valorización energética. El fango de EDAR, bien sea digerido o no, es un combustible potencial que después de su deshidratación precisa de un secado con unos tratamientos más o menos intensivos desde la óptica térmica. Para realizar el secado del fango hay un sinfín de sistemas y tecnologías que tienen una eficiencia y unos condicionantes muy dispares. Este artículo se centra en el estudio de un sistema sostenible desde el punto de vista energético.

Palabras clave
EDAR, fango, secado, valorización energética.

Wastewater sludge: drying process and energetic use

Wastewater sludge management has every day more economic repercussion in a wastewater treatment plant (WWTP) operating costs. The sludge process can follow two ways: anaerobic digestion; and the dried with later energetic valuation. WWTP sludge, digested or not, is a potential fuel that after its dehydration needs a drying process with a high or low intensive treatments. There are a lot of systems and technologies to dry sludges, with several efficiencies and determining. This article studies a sustainable system from the energetic point of view.

Keywords
WWTP, sludge, drying process, energetic valorisation.



1. Introducción

El objetivo de las EDAR consiste en el tratamiento de las aguas residuales de las diferentes poblaciones hasta alcanzar las condiciones de vertido a cauce público, o a mar, establecidas por las diversas normativas en vigor. La fracción sólida y buena parte de los contaminantes contenidos en el agua tratada son separados conjuntamente como fango residual, cuya gestión es cada día más complicada y costosa, de forma que puede pasar a ser el principal problema en la gestión de las EDAR. Esto hace que sea preciso tener presente unas consideraciones preliminares:

- La tendencia en la Unión Europea y en los Estados Unidos es realizar un pretratamiento antes del vertido o la aplicación al suelo del fango, actuación que en España mayoritariamente todavía no se realiza.

- El compostaje no se puede realizar a partir de cualquier tipo de fango y, además, algunas plantas presentan problemas de seguridad, aparte de que en general hay dificultades en dar salida al compost. La Directiva Marco de Residuos de 2008 también va en este sentido.

- La cogeneración, como apoyo económico al secado térmico de fangos, prácticamente no se emplea en la Unión Europea, y cada vez se usará menos debido al incesante aumento del precio del gas natural.

2. Los fangos de EDAR y su problemática energética

En las EDAR se genera un fango con un contenido en materia sólida que oscila del 4 al 6%. A partir de este momento, y como se indica en la **Figura 1**, es preciso decidir el camino entre la digestión anaerobia o la deshidratación mecánica y posterior secado. En la digestión anaerobia se extrae un potencial energético en forma de gas, el cual es muy fácil

y barato de valorizar. Pero el fango resultante debe seguir un camino semejante al de la otra línea, con la ventaja de que el fango digerido no huele y es más cómodo de procesar.

La línea de deshidratado, proceso mecánico, extrae del fango una importante cantidad de agua, hasta llegar a una sequedad del orden del 22-27%. En ambos supuestos, y en particular en el caso de los fangos deshidratados, se vislumbra que existe una demanda energética asociada al tratamiento de fangos.

2.1. La posibilidad de la digestión anaerobia

No es objeto de este texto explicar los fundamentos de la digestión anaerobia, proceso bien conocido y experimentado. Sin embargo, es necesario exponer una serie de comentarios y sugerencias sobre la producción de biogás en los aspectos relacionados con:

- La codigestión.
- Los pretratamientos.
- El régimen de funcionamiento del digestor.

Desde el punto de vista de la generación de biogás, es decir la meta-

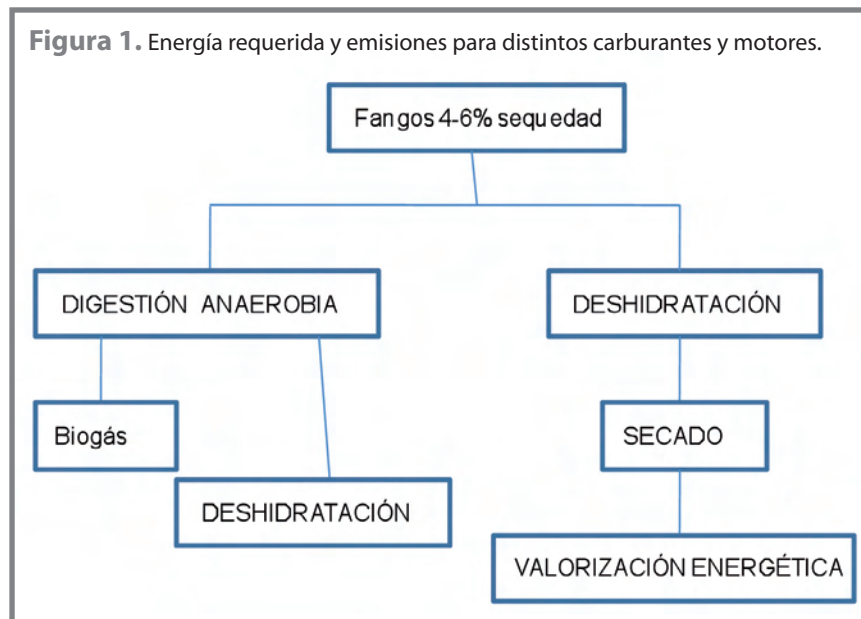
nización de la fracción orgánica del fango de EDAR, esta biomasa no es precisamente la mejor para generar biogás por medio de la digestión anaerobia. Por ello, es conveniente actuar sobre los tres parámetros citados con el fin de optimizar la producción de biogás. Desde la óptica energética, la mayor o menor producción de biogás puede ayudar a solventar el problema energético asociado a la generación de fangos de EDAR.

2.1.1. La codigestión

La codigestión consiste en la digestión conjunta de dos biomásas que puedan complementarse desde el punto de vista del análisis elemental de manera que los ratios C/H conduzcan a una producción mayor de biogás que la que se originaría con la digestión de cada uno de los fangos por separado.

En este campo se ha prosperado mucho en el norte de Europa, donde la adición de fangos de matadero a los purines producidos en las granjas porcinas ha incrementado extraordinariamente la generación de biogás y, con ello, obviamente la rentabilidad económica. En primer lugar, por la percepción de un canon

Figura 1. Energía requerida y emisiones para distintos carburantes y motores.



Uno de los parámetros que más influyen en la producción de biogás estriba en una buena preparación de la biomasa, a escala celular, a la entrada del digestor

por el tratamiento de un residuo externo (el fango de matadero) y, en segundo lugar, porque al aumentar la producción de biogás también lo hace la electricidad producida y, por tanto, los ingresos.

En España se dispone de una fuente casi inagotable de residuo fermentable: la form, acrónimo de fracción orgánica de los residuos municipales, que procede del tratamiento de los residuos municipales que no se han recogido selectivamente, en particular en los eco-parques. Si bien no se trata de una biomasa de primera calidad, pues en general se encuentra contaminada, no hay duda de su contribución al incremento de la materia orgánica en el digestor.

2.1.2. Los pretratamientos

Uno de los parámetros que más influyen en la producción de biogás estriba en una buena preparación de la biomasa, a escala celular, a la entrada del digestor. La materia seca, a la salida de la EDAR, está formada, en su mayor parte, por microorganismos, que son elementos pluricelulares con una corteza más o menos resistente que, a su vez, ha de ser atacada por bacterias mesófilas para descomponerlas y transformarlas en metano.

Para proceder a la rotura de la pared celular y acelerar el proceso de metanización, el sistema más probado y antiguo es el de la aplicación de ultrasonidos. Los generadores de ultrasonidos emiten una onda que rompe la pared celular, pues esta onda de sonido genera presiones positivas y negativas en el medio que se

traducen en la formación de microburbujas (fenómeno llamado cavitación inducida). La cavitación causa cambios en los equilibrios químicos del agua debido a que los enlaces de hidrógeno entre las moléculas de agua y los sólidos disueltos se rompen, dando lugar a la separación de sólidos y gases.

Sin embargo, desde el punto de vista operativo, el sistema presenta un pequeño inconveniente: la acción de los ultrasonidos es indirecta y solo es contundente sobre la biomasa que se encuentra en su trayectoria, pero es poco efectiva sobre los microorganismos que están inmediatamente por detrás, puesto que la onda ha perdido casi toda su energía cinética. Por ello, es preciso hacer pasar el caudal de fangos a través de tuberías de poca anchura de forma que la biomasa se halle expuesta directamente al haz de ondas. La fuerza implosiva de las microburbujas de vapor con temperaturas y presiones elevadísimas son muy eficientes, pero en áreas muy delimitadas, del orden de 2 nanómetros. Al mismo tiempo da lugar a la formación de radicales altamente reactivos (H, OH, H₂O₂, etc.), pero efímeros.

Los ultrasonidos son sonidos no perceptibles por los humanos. Son ondas de compresión y expansión que han de propagarse en medios materiales, es decir, a través de sólidos, líquidos o gases. Su rango de frecuencia está comprendido entre 20 hertzios y 16 kilohertzios. Un hertzio significa un ciclo de compresión o expansión por cada segundo. Un sonido alcanza la clasificación de

ultrasonido si su frecuencia supera los 16 kilohertzios, por lo que en principio resultará inaudible, aunque su intensidad fuese superior a la de un motor a reacción.

El uso práctico de los ultrasonidos está bastante generalizado. Ejemplos cotidianos son: soldadores y perforadores ultrasónicos, los ultrasonidos para disgregar cálculos renales o biliares, o los baños de limpieza ultrasónica. Sin embargo, es interesante ahondar en los efectos de los ultrasonidos de alta intensidad, fundamentalmente sobre medios líquidos, productores del fenómeno conocido como cavitación hidrodinámica, del que se derivan interesantes consecuencias dentro de la química.

Las fuentes de ultrasonidos, con suficiente intensidad, aplicadas a los líquidos producen también el fenómeno de la cavitación. Pero la consecuencia química de ello, la sonoquímica, tan solo se inició hace unos 10 años, cuando se pudo disponer en los laboratorios de generadores de ultrasonidos eficientes de alta intensidad. Los ultrasonidos poseen unas longitudes de onda comprendidas entre 10 cm y 0,01 mm. Ello significa que su tamaño es muy superior al de las moléculas, por lo que sus efectos no pueden ejercitarse a través de una interacción física directa entre las ondas y las moléculas que son alcanzadas por ellas. Lo que ocurre es que las ondas de ultrasonidos pasan al líquido, donde el ciclo de expansión produce una presión tan negativa que hace que localmente se separen las moléculas del líquido, creando allí una verdadera cavidad.

Usualmente, ello tiene lugar en los sitios previamente contaminados de la disolución, aquellos en los que existen pequeñas partículas o microburbujas. Las cavidades así formadas absorben la energía procedente de



las ondas ultrasónicas y crecen más o menos rápidamente, según los diversos parámetros y circunstancias conocidos, hasta llegar a un límite. En ese momento se comprime rápidamente la cavidad gaseosa, se colapsa, se produce su implosión, lo que genera una gran cantidad de calor, que puede alcanzar los 5.000 °C, junto a una gran presión, que puede llegar a las 1.000 atmósferas, en un proceso de duración casi instantánea.

Todo ello es, pues, un mecanismo que sirve para concentrar, en forma de energía química útil, la energía difusa que portaba la onda ultrasónica. El abanico de posibilidades que se está abriendo es muy amplio, incluyendo los sistemas líquidos que contienen partículas metálicas en suspensión. Se puede conseguir que impacten entre sí a velocidades de unos 2.000 km/h, con temperaturas tales que es posible su fusión selectiva. La acción de los ultrasonidos sobre ciertas mezclas de hidrocarburos ha conducido a resultados semejantes a los que se obtienen mediante los complejos sistemas de pirólisis a alta temperatura.

Otros sistema, probablemente más eficiente por lo que hace referencia a la instalación, es la hidrólisis térmica. Este consiste en confinar el fango, antes de entrar en el reactor, en un depósito en el que se calienta hasta casi 200 °C. En estas condiciones el vapor es muy eficiente de cara a la rotura de las paredes celulares y prepara muy bien la biomasa para su ingreso en el digestor. Antes de entrar en él, el fango debe enfriarse hasta los 30 °C, temperatura a la que las bacterias mesófilas pueden interaccionar con la biomasa.

En los pretratamientos térmicos el calor aplicado rompe los enlaces químicos de las células y las membranas, solubilizando los componentes de la célula, que están más acce-

sibles para la posterior degradación anaerobia. La temperatura de proceso depende de la biomasa a tratar. Por ello es tan necesario conocer la caracterización de los fangos a procesar.

2.1.3. El régimen de funcionamiento del digestor

Existen dos regímenes estándar de funcionamiento de los digestores anaerobios: el régimen mesófilo, a unos 35 °C; y el régimen termófilo o de alta temperatura, a unos 55 °C. El régimen mesófilo es, con diferencia, el más común. En el caso de una avería es fácil reponer la flora bacteriana, ya que esta es muy extensa y relativamente fácil de recuperar. Por el contrario, el régimen termófilo se usa poco para el tratamiento de fangos de una planta depuradora. El sistema es más efectivo que el mesófilo (genera más biogás en igualdad de condiciones), pero en caso de accidente las bacterias son más sensibles y difíciles de recuperar para que el digestor vuelva a funcionar normalmente. Desde el punto de vista energético es un proceso de conversión energético eficiente, ya que con muy poca energía (los sistemas de bombeo y agitación del fango) puede generarse mucho gas combustible.

2.2. La digestión como fuente de suministro de energía

El digestor anaerobio es una instalación destinada a transformar parte de la materia orgánica contenida en el fango de EDAR en biogás. Por ello, cuanto mayor sea la cantidad de gas que se genere, mayor será el rendimiento de la conversión energética y menor carga orgánica permanecerá en el digestato. Los criterios que definen la producción de biogás, partiendo de la base de que el sustrato a tratar es fango de EDAR, son:

- La codigestión.
- El pretratamiento del fango.
- El régimen de funcionamiento del digestor.

Además, la digestión lleva a cabo un proceso de higienización, por lo que, en la mayoría de casos, el tratamiento anaerobio es suficiente para la posterior valorización agrícola de los fangos deshidratados.

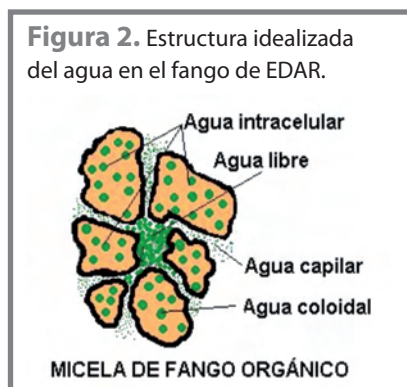
Los fangos, procedan o no de la digestión anaerobia, salen de la EDAR con una sequedad baja, por lo que es imprescindible que pasen por una etapa de deshidratación y, si se quiere, de secado

3. Secado de fangos

Los fangos, procedan o no de la digestión anaerobia, salen de la EDAR con una sequedad que oscila entre el 3 y el 6%. Por tanto, es imprescindible conducirlos a la planta de deshidratación para aumentar el nivel de sequedad hasta el 22-27%. Finalmente, si se cree conveniente o necesario, se pasa a la etapa de secado para incrementar la sequedad hasta el 85-90%

El secado es una operación básica de proceso industrial por la cual se extrae el agua de la materia húmeda (en este caso del fango de EDAR), de manera que la humedad final sea del 10-15%. No tiene sentido, en la mayoría de los casos, lograr reducir la humedad a valores inferiores, ya que la propia humedad relativa del aire ambiente lo va a rehumedecer, puesto que el fango es un material higroscópico. Técnicamente, hay que distinguir dos fases en la etapa de secado:





- Primera etapa. El agua se evapora en la superficie y la velocidad de evaporación es constante ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{m}^2\cdot\text{h}$). Durante esta etapa, la salida de agua del interior de la materia comporta una disminución del volumen del cuerpo (contracción en secado). En esta etapa no es preciso aplicar calor al sistema, ya que la evaporación tiene lugar solo en la superficie del sólido y el parámetro más relevante es la velocidad del aire.

- Segunda etapa. El agua debe ser evaporada en el poro, o capilar, donde permanece y salir a la superficie en forma de vapor. En esta etapa no hay apenas contracción. Debido a que el agua debe evaporarse en el interior de un recinto (poro) donde el aire no tiene acceso, es fundamental la intervención del calor. En el caso de los fangos de EDAR, la problemática energética se agrava, ya que el tamaño del poro es muy pequeño y las fuerzas capilares juegan en contra porque dificultan la salida del vapor de agua. De ahí que el secado térmico sea un gran demandante de energía.

3.1. Etapas del secado desde el punto de vista energético

La eliminación del agua de cualquier cuerpo es una operación cara desde la óptica energética. Por ello, hasta donde sea posible, hay que emplear en primer lugar los sistemas mecánicos, siendo el más usado la centrifugación, al que sigue el filtro

banda. El primero es más efectivo, pero también precisa más cantidad de reactivo. El modelo mecánico que consigue mayor grado de sequedad es el filtro prensa, pero requiere más mano de obra y no suele emplearse para la deshidratación mecánica de fangos de EDAR. Todos ellos tienen el denominador común del bajo consumo de energía por unidad de agua separada. El paso siguiente, es decir, la casi total eliminación del agua, es el secado en sus diferentes versiones. No obstante, para entender su interrelación con el vector energía es preciso llevar a cabo un recordatorio sobre la naturaleza física del fango a tratar.

3.2. Naturaleza del fango a secar

Para poder evaluar la necesidad de energía asociada al proceso de secado de fangos de EDAR es preciso ahondar en la caracterización físico-química de los propios fangos. Al margen del agua presente, la materia seca se compone de:

- Microorganismos.
- Materiales lignocelulósicos.
- Lípidos, proteínas e hidratos de carbono.
- Materia inorgánica.

La materia inorgánica contenida en los fangos suele ser del 35%, valor que depende de la configuración de la EDAR y, obviamente, del propio fango a tratar. No obstante, a diferencia de la materia inorgánica convencional (arenas, tierras, etc.) que no tienen porosidad, la materia inorgánica de los fangos son sales formadas en el seno de las propias aguas residuales y material inerte de muy pequeño tamaño.

De esta manera, el material inorgánico, además de contener sales higroscópicas, tiene una gran superficie específica, lo que le confiere

Tabla 1. Fórmula química de algunos compuestos presentes en los fangos de EDAR.

Residuo	Fórmula química empírica
Proteínas	$\text{C}_{16}\text{H}_{24}\text{O}_5\text{N}_4$
Carbohidratos	$(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_X$
Grasas y aceites	$\text{C}_{50}\text{H}_{190}\text{O}_6$
Fangos primarios	$\text{C}_{22}\text{H}_{39}\text{O}_{10}\text{N}$
Fangos combinados	$\text{C}_{10}\text{H}_{19}\text{O}_3\text{N}$
RDF	$\text{C}_{64}\text{H}_{104}\text{O}_{37}\text{N}$
Madera	$\text{C}_{295}\text{H}_{420}\text{O}_{186}\text{N}$
Hierba	$\text{C}_{23}\text{H}_{38}\text{O}_{17}\text{N}$
Basura	$\text{C}_{16}\text{H}_{27}\text{O}_8\text{N}$
Microorganismos	$\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$
Hongos	$\text{C}_{10}\text{H}_{17}\text{O}_6\text{N}$

una gran capacidad de adsorción, o de retención de agua, más de la que cabría esperar de la simple identificación de la naturaleza de la materia inorgánica.

Pero el problema de la extracción de agua proviene, básicamente, de la materia orgánica. Esta, como muestra la **Figura 2**, tiene un tamaño de partícula extremadamente pequeño e irregular, con lo que es capaz de retener gran cantidad de agua en su interior que es muy difícil de extraer.

El agua libre, la más fácil de extraer, se encuentra en el interior de la materia, es decir, no está en contacto con la superficie, con lo que el secado va a resultar muy complicado. El agua intracelular todavía va a ser más difícil de eliminar y la coloidal, que de una manera u otra forma parte de la materia orgánica, conlleva un grado mayor de dificultad. Las modalidades más abundantes de agua son las más difíciles de extraer. Así pues, esta particularidad condiciona que el sistema de secado sea, básicamente, a elevada temperatura, de ahí que se denomina



térmico.

Los biólogos analizan la materia orgánica desde el punto de vista de su estructura funcional, como por ejemplo la naturaleza de los numerosos microorganismos, proteínas, lípidos, etc. A su vez, el denominado análisis racional es el equivalente al análisis inmediato que se lleva a cabo en los combustibles convencionales, pero con la diferencia que se indica la naturaleza de los integrantes de la materia orgánica y, por tanto, se analiza el contenido de microorganismos, grasas y aceites, componentes lignocelulósicos e inertes.

Precisamente, esta caracterización racional del fango de EDAR debería ser un capítulo para espolear a los técnicos especializados en el diseño de depuradoras de manera que el funcionamiento de las mismas permitiera la segregación de las diferentes fracciones a lo largo del proceso. Es decir, un fango rico en proteínas y lípidos, como es que resulta de un matadero industrial, tendría que destinarse a la obtención de biodiesel. Esta aplicación resulta mucho más racional y, sobre todo, más económica que la oxidación biológica en el reactor. Así, si un fango se halla descrito de esta forma, proteínas, lípidos, etc., es posible comprender mucho mejor su transformación de acuerdo con el sistema de conversión energético elegido, en particular los procesos bioquímicos o de baja temperatura, como por ejemplo la digestión anaerobia. La **Tabla 1** muestra los compuestos residuales orgánicos más habituales en los fangos de EDAR.

Existen infinidad de fangos de EDAR y gran variedad de sistemas de tratamiento, lo que se traduce en que la caracterización del fango va a ser muy variable.

Para proponer un ejemplo más amplio se toma un fango de las ca-

Tabla 2. Caracterización del fango de EDAR.

Caracterización del fango		Porcentaje		
Cantidad de fango primario		50%		
Cantidad fango del biológico		50%		
Estructura biológica de las fracciones medias	% peso	PCI útil	kcal/kg	kW/kg
Proteínas	28%	3.597	1.005	
Carbohidratos	20%	3.449	684	
Lípidos	7%	5.488	391	
Fibras	10%	3.741	381	
Inertes	35%	-	-	
Total	100%		2.461	2,86

racterísticas que aparecen en la **Tabla 2**, que corresponde a una mezcla de dos fangos de ciudades industriales de las cercanías de Barcelona y se compone, a su vez, de un 50% de fango primario y un 50% del fango del tratamiento biológico. Se describe también, de manera simplificada, sus componentes naturales (proteínas, lípidos, etc.), que ayudan mejor a comprender su transformación de acuerdo con el modelo de conversión energético elegido, en particular los sistemas bioquímicos o de baja temperatura.

Sin embargo, desde el punto de vista de la conversión energética, que constituye la temática desarrollada en este artículo, la caracterización se expresa en otros términos: microorganismos, fracción lignocelulósica, etc. De hecho, si bien bioló-

gicamente es correcta la descripción anterior, el fango contiene microorganismos que son una mezcla de proteínas, carbohidratos y lípidos. No obstante, en las equivalencias de conversión hay algunas modificaciones y aproximaciones, lo que explica que los valores de la **Tabla 3** (que son los que se usan en lo sucesivo) sean ligeramente diferentes a los de la **Tabla 2**.

De esta manera, si la **Tabla 2** aporta comprensión a la biodegradabilidad, la **Tabla 3** ayuda a interpretar mejor los fenómenos de conversión energética termoquímicos. Así pues, se concluye que los fangos de EDAR tendrán, a parte de los materiales indicados, por término medio, una gran cantidad de contaminantes que los harán inservibles para los usos a que habitualmente se desti-

Tabla 3. Estructura energética de los fangos.

Estructura energética del fango	% peso	PCI útil	kcal/kg	kW/kg
Microorganismos	40%	2.262	905	
Grasas y aceites	15%	8.448	1.267	
Lignocelulósicos	10%	3.741	374	
Inertes	35%	-	-	
Total	100%		2.546	2,96

Los compuestos contaminantes que puede contener un fango de EDAR son los metales pesados, algunos de ellos tóxicos, y los contaminantes orgánicos

naban, debiéndose emplear una vía de tratamiento más contundente como es el secado.

Los compuestos contaminantes que potencialmente puede contener un fango de EDAR son:

- Elementos potencialmente tóxicos: metales pesados tipo cadmio, cromo (tetra y hexavalente), cobre, mercurio, níquel, plomo y zinc, muchos de ellos procedentes de los productos químicos del hogar.

- Contaminantes orgánicos: hidrocarburos poliaromáticos, PCB, ftalatos y derivados del benceno. Algunos de estos compuestos son fácilmente degradables en el proceso de depuración de las aguas, mientras que otros son persistentes y llegan a formar parte del fango.

Otros compuestos de relevancia, pero cuyas consecuencias a largo plazo están poco estudiadas, son el arsénico, el selenio y la plata, que junto a las sustancias estrogénicas pueden identificarse por su origen en los productos farmacéuticos de consumo.

3.2.1. La biodegradabilidad

Se define así la susceptibilidad de una sustancia a ser descompuesta por microorganismos. Específicamente, es la velocidad a la cual las bacterias y factores naturales del medio ambiente pueden descomponer químicamente determinados compuestos como la materia orgánica,

detergentes, pesticidas, etc. Ensayos y tests llevados a cabo en cierto número de compuestos han arrojado los resultados siguientes:

- Fácilmente biodegradables: n-propanol, etanol, ácido benzoico, benzaldehído, acetato de etilo.

- Menor biodegradabilidad: etilenglicol, isopropanol, ortocresol, dietilenglicol, piridina, trietanolamina.

- Resistentes a la biodegradación: anilina, metanol, monoetanolamina, metil-etil cetona, acetona.

Así, en los términos que se describe en la **Tabla 2**, la biodegradación de las proteínas es mucho más lenta y complicada que la de los lípidos y fibras. Sin embargo, en el caso de los lípidos, las largas cadenas de los ácidos grasos son muy difíciles de degradar. Dentro de los llamados residuos orgánicos existe una infinidad de variedades de las que convendría llevar a cabo una breve clasificación, puesto que la mayoría de ellos de una u otra forma se hallan presentes en los fangos de EDAR.

Los denominados *soft organics*, en terminología inglesa, son la forma estrictamente. Corresponden a aquellas estructuras en las que el principal componente celular es el agua, es decir, los vegetales: frutas, verduras, restos de jardín (en particular los de césped), hojas y raíces.

A lo largo del tiempo se establece una interacción entre el agua celular y la de humedad. Al iniciarse el proceso de descomposición, el agua de constitución se transforma en agua de humedad. Esto mejora los parámetros de compostaje, y simultáneamente empeoran las condiciones para la transmisión de patógenos. Todos ellos presentan ciertas dificultades para su compostaje derivadas de la pérdida de humedad que deben ser superadas mediante las condiciones de operación, recirculación

de los lixiviados o adición de agua.

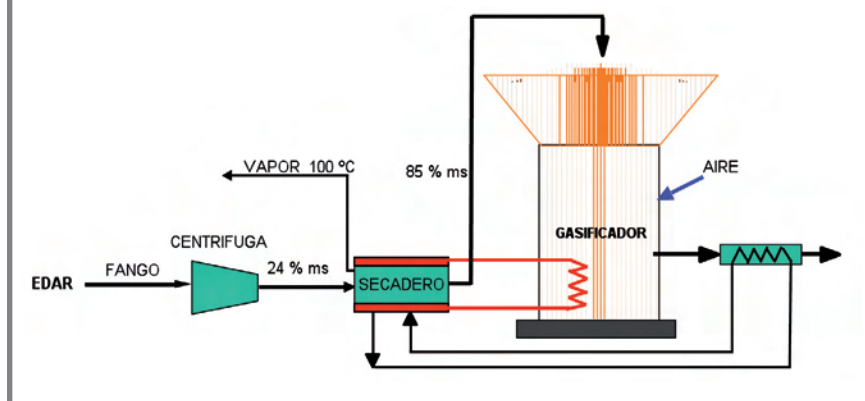
Los llamados *hard organics* son, técnicamente, aquellos en que la relación de agua celular con respecto a la masa total es muy inferior a los anteriores. En los procesos de compostaje, prácticamente no dan lugar a lixiviados y desprenden pocos COV (que se traducen en malos olores), si bien precisan agua externa para el proceso.

Ejemplos típicos de este grupo son los restos de poda, incluyendo las hojas frescas. La estructura celular de estos materiales está formada básicamente por lignina y celulosa y contienen poca agua celular. Muchos de ellos presentan una descomposición muy lenta o casi nula en presencia de bacterias. Ciertos hongos producen una rápida degradación pero esta clase de microorganismos no resiste bien la temperatura. A esta clase pertenecen la paja, los restos de madera, el papel, las hojas secas, etc.

Los residuos ricos en ciertas proteínas se descomponen rápidamente. Así, la sangre de animales, los productos lácteos o los restos de aves se degradan con gran rapidez. Sin embargo, el proceso desprende muy mala olor y las sustancias generadas pueden inhibir los procesos de compostaje. Por esta razón, solo deben ser tratados en los sistemas de gestión anaerobia.

Por lo que hace referencia a las deyecciones animales, en primer lugar debería hacerse una distinción previa entre los residuos procedentes de animales carnívoros y herbívoros. Los primeros, donde hay que incluir los procedentes de los humanos, contienen gran cantidad de gérmenes patógenos y organismos parasitarios. Desde el punto de vista de los residuos, a este grupo corresponden los fangos de las depuradoras urbanas que, si bien son una buena fuente de nitrógeno y

Figura 3. Sistema de valorización energética de fangos de EDAR usando la energía del fango para su propio secado.



materia orgánica, suponiendo que estén exentos de metales pesados, hay que garantizar su higienización para el posterior uso.

Los residuos procedentes de los animales herbívoros son diferentes a los anteriores, pues contienen muy pocos agentes patógenos y parásitos, por lo que constituyen una buena fuente de nitrógeno para el compost. Además, su contenido proteico no es lo suficientemente importante como para generar malos olores. Desde el punto de vista del reciclaje, el problema que presentan es su consistencia acuosa, en parte motivada por los sistemas de recogida, que recuerda un fango primario de EDAR.

De hecho, son una mezcla de residuos en los que, en mayor o menor cantidad, se hallan presentes todas las tipologías antes descritas. El análisis de conversión energética de un fango de EDAR está basado precisamente en la biodegradabilidad de las diversas fracciones que lo integran.

Las tasas de conversión de materia orgánica en biogás dependen básicamente de la composición (así, a mayor cantidad de lípidos más DQO, mayor poder calorífico y más producción de biogás). Para dar un punto de referencia, la digestión

anaerobia de ciertas materias orgánicas puede generar, como valores promedios:

- Residuos de césped: 110 m³ biogás/ t.
- Residuos de cocina: 150 m³ biogás/ t.
- Residuos de grasas: 500 m³ biogás/ t.
- Fangos de matadero: 40 m³ biogás/ t.
- Purines de cerdo: 15 m³ biogás/ t.
- Gallinaza: 60 m³ biogás/ t.

3.3. Proceso habitual de secado de fangos

El fango de EDAR, debido a su composición, tiene tendencia a fermentar. Este hecho unido al alto contenido en agua y la presencia de patógenos, hace que se requiera uno o varios tratamientos combinados previamente a su destino final, como la deshidratación, la estabilización, la desinfección (digestión o compostaje), el secado térmico y la oxidación térmica a alta temperatura. De todos los sistemas enumerados el que lleva asociada una carga energética más importante es el secado térmico. Los problemas que aparecen en la fase de secado suelen estar ocasionados por la naturaleza del fango.

Desde el punto de vista ambiental

y de sostenibilidad, lo lógico es usar el potencial energético de los fangos para proceder a su propio secado. De esta manera, se elimina el problema del volumen y peso del fango debido a su elevada humedad, no se emplea combustible fósil para el secado y solo queda, después de su valorización, un pequeño residuo correspondiente a la fracción inorgánica del fango. La **Figura 3** muestra, de forma esquemática, una instalación de gasificación de fangos con presecado previo. El fango es introducido en el secador con el habitual 22-27% de materia seca y lo abandona con el 85% de sequedad (no todos los sistemas precisan de este grado de sequedad) para entrar en el reactor de gasificación del ejemplo.

4. Aspectos energéticos relacionados con los fangos de EDAR

El secado es una operación de superficie en la cual el agua del sólido pasa a la fase de vapor, que es transferido al aire. El proceso se estructura en dos fases:

- Etapa de secado, donde el agua se halla en la superficie del sólido y vaporiza gracias a la energía cinética del aire circundante. Esta fase es poco energética ya que lo que precisa es velocidad de aire sobre la superficie del fango. No obstante, esta etapa es muy poco significativa en el caso de los fangos de EDAR, ya que la mayor parte del agua no se halla en estas condiciones.

- Etapa de secado térmico. En ella el agua debe evaporarse en el interior del material y, ya en forma de vapor, migrar a la superficie donde se incorpora a la corriente de aire. Como es fácil de entender esta etapa va a ser muy demandante de energía, ya que en los fangos el agua se halla adsorbida en los in-

Figura 4. Invernadero para secado de fangos de EDAR.

tersticios moleculares y será preciso calentar toda la masa para que el agua se vaporice. De ahí el nombre de secado térmico.

El consumo energético ligado al secado de fangos tiene que ver con el sistema de secado empleado, lo que permite usar una fuente de calor más o menos sostenible. Simplificando un tanto, en los apartados siguientes se describen estos tres sistemas:

- El secado solar en invernadero.
- Los secados térmicos convencionales.
- El secado solar en capa fina.

4.1. Secado solar en invernadero

En ellos el fango deshidratado se extiende por el interior de un invernadero. La radiación solar penetra hacia el interior y calienta progresivamente la masa de fangos. Un robot, debidamente programado, se encarga de remover los fangos para que aflore a la superficie el fango a calentar y facilite la salida del vapor. Estos sistemas deben ir, en su mayor

parte, acompañados de un aporte auxiliar de calor. Para ello, es interesante usar calores residuales a baja temperatura, que son impulsados al interior del recinto y, una vez dentro, recirculados de manera que intenten suplir la falta de radiación solar. Ob-

viamente, este sistema auxiliar es el que funciona durante las horas nocturnas y de apoyo en las horas de muy poca o nula insolación. La **Figura 4** muestra una fotografía del proceso.

4.2. Secados térmicos convencionales

En ellos la fuente de calor puede ser la combustión directa de un combustible convencional o el aprovechamiento del calor residual de los gases de escape y el agua caliente procedentes de un motor de cogeneración. Existen numerosos sistemas de secado cuyo principio de funcionamiento se basa en la transmisión de calor, ya sea por conducción de calor (contacto del fango con la estructura metálica caliente del secador), por convección (donde la corriente de aire de gases calientes entra en contacto con la masa de fangos a secar) y por radiación (donde la gran temperatura de la estructura metálica del secador emite

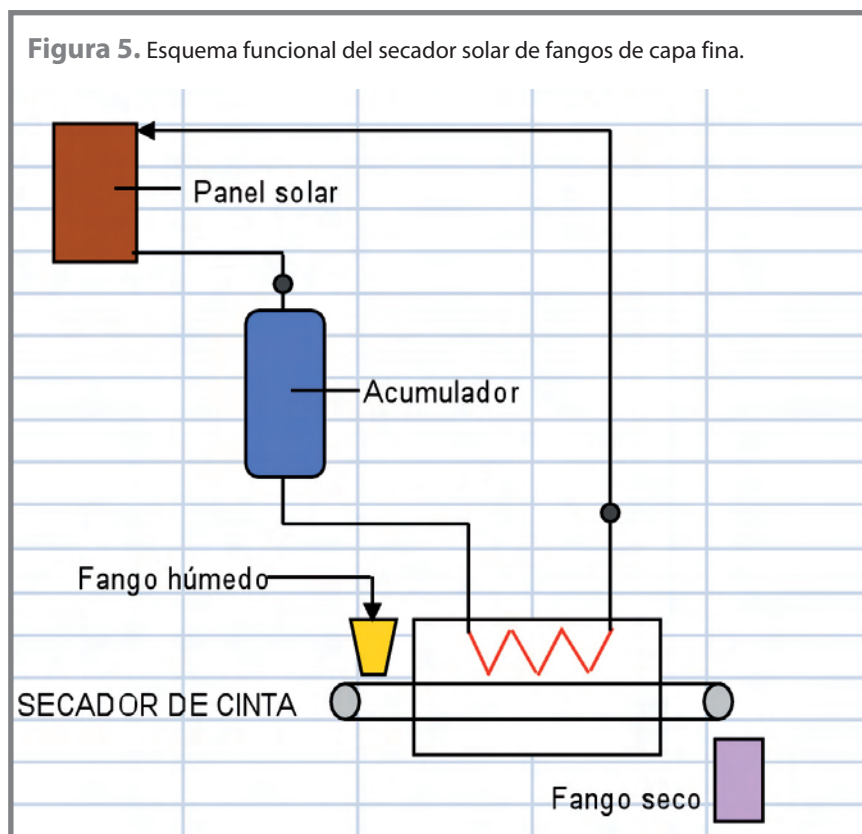
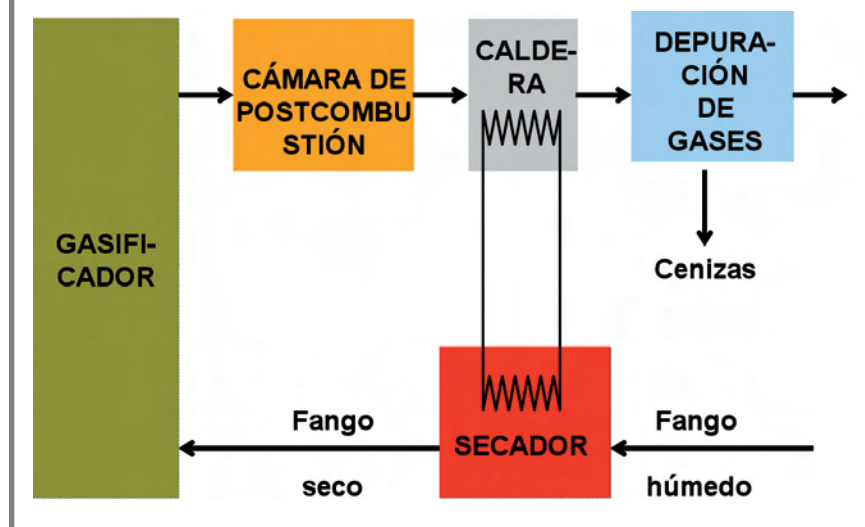
Figura 5. Esquema funcional del secador solar de fangos de capa fina.



Figura 6. Esquema de funcionamiento de la valorización energética de los fangos de EDAR en circuito cerrado.



radiación contra el fango a secar). En el mundo industrial lo normal es que el principio de funcionamiento de los secadores sea una combinación de uno o más de los sistemas descritos anteriormente.

En todos los casos el vapor de agua y compuestos volátiles son transferidos a una corriente de gases que debe circular en circuito cerrado. Hay que señalar que, en España, lo más habitual es usar la cogeneración como fuente de calor para el secado térmico. Estos sistemas están diseñados para generar electricidad por lo que, la cantidad de energía

térmica es reducida. Desde el punto de vista económico el proceso es solo rentable en la medida que el precio de venta de la electricidad sea elevado y, obviamente, el coste del gas natural reducido.

4.3. Secado solar en capa fina

En este sistema la fuente de calor es la radiación solar que calienta el agua que circula por los paneles solares. El agua es vehiculada hacia unos intercambiadores que transfieren el calor al fango por conducción y radiación. Es importante destacar el hecho de que el sistema funcio-

na en capa fina. Es decir, el espesor de la capa de fango sobre la cinta transportadora que hay en el interior del secador es muy delgada (hay que tener presente que la estructura porosa del fango a secar unida al hecho de que el fango ha atrapado en su interior gran cantidad de aire conduce a que el material se torne muy poco conductor del calor lo que dificulta el proceso de secado). La **Figura 5** muestra el principio de funcionamiento de un secador de estas características.

4.4. Cerramiento del ciclo energético en la gestión de los fangos de EDAR

Al margen del tipo de secador solar que se ha descrito en último lugar, existe otro sistema que, desde el punto de vista energético, puede considerarse sostenible y se basa en la gasificación (también puede ser la incineración) del fango para aprovechar el poder calorífico del mismo.

El sistema consiste en la gasificación de los fangos una vez estos han alcanzado una sequedad del orden del 50%. En estas condiciones, y como indica la **Figura 6**, se introducen en un gasificador. Este convierte la fracción orgánica de los fangos en gases combustibles, básicamente CO , H_2 y CH_4 que, posteriormente, son oxidados en una caldera de vapor. El vapor generado es usado para secar el fango desde la sequedad de entrada 22-27% hasta el 50%. Con ello no se precisa aportación de calor externo y el proceso es, energéticamente, autosostenible. En el caso de emplear la incineración en lugar de la gasificación el sistema es muy semejante al descrito.

5. Potencial del fango como combustible

El fango de EDAR es un buen combustible, ya que su poder calorífico inferior (PCI) se sitúa alrededor de

Tabla 4. PCI de algunos fangos de EDAR.

Tipo fango	Materia volátil	C Fijo	Ceniza	kcal/kg
Digerido P+S	50,5	11,7	37,6	3.461
Digerido P+S	57,5	11,9	30,4	4.009
Digerido P+S	47,3	10,7	41,9	3.292
Digerido P+S	59,6	12,8	27,4	4.294
Sin digerir P+S	61,6	9,3	28,7	3.966
Sin digerir P+S	44,8	7,6	47,5	2.717
Sin digerir P+S	69,7	8,3	22,1	5.500
Sin digerir P +S	70,7	17,5	11,7	4.656

las 3.500 kcal/kg. Lo que sucede es que para que su conversión térmica sea autosostenida es preciso eliminar previamente una parte importante del agua y conseguir un PCI útil como el indicado. El proceso de generación de fangos determina y condiciona su composición, ya que a lo largo del proceso:

- Se incrementa la materia orgánica.
- Aumenta el P y el N.
- Disminuye el S (de los sólidos).

En la **Tabla 4** se distinguen varios PCI de fangos de EDAR. La nomenclatura 'digerido P+S' significa fango producido en el tratamiento primario y secundario y digerido anaerobiamente. El término 'sin digerir' significa que los fangos no han sido

sometidos a la etapa de digestión anaerobia. A su vez, la **Tabla 5** corresponde a los mismos fangos con su análisis elemental.

En la **Tabla 6** se exponen los parámetros más representativos de diferentes tipos de fangos, siempre referidos a la base seca. En ella se pone de manifiesto que el PCI de determinados fangos es superior al de algunos combustibles convencionales, como los residuos sólidos urbanos (RSU), cuya naturaleza combustible nadie pone en duda.

5.1. Residuos secundarios del proceso

Los fangos de EDAR contienen, de promedio, un 35% de materia inorgánica que durante la conversión energética se recupera en forma

de ceniza. Cada tonelada de fango deshidratado (22% de sequedad) que entra en el sistema representa un caudal de 77 kg/hora de materia inorgánica.

En un sistema de conversión energético como el descrito (caso del gasificador), se precisa de un lavado de gases donde al material inorgánico se le añadirán los compuestos típicos de esta fase de tratamiento: sales, exceso de reactivos, carbón activo, polvo, etc. Es decir, que la cantidad final de residuos secundarios va a ser notable. De ahí la importancia de diseñar un sistema que desde el origen prevea estas contingencias.

6. Conclusiones

Los sistemas anaerobios de digestión de fangos pueden llegar a ser muy eficientes, en términos de generación de energía, si se cumplen una serie de requisitos. Desde el punto de vista energético, los fangos de EDAR solo son combustibles cuando llegan a un umbral de sequedad que se acerca a un 50%. Por tanto, para eliminar esta agua es preciso llevar a cabo un secado aunque sea de carácter parcial.

El secado es la etapa más energéticamente demandante del proceso, por lo que es recomendable usar sistemas más sostenibles en el manejo de la energía como los que, por ejemplo, utilizan el sol como fuente energética.

Bibliografía

- [1] Elias, X. (2005). 'Tratamiento y valorización energética de residuos'. Ed. Díaz de Santos, Madrid.
- [2] Elias, X. Máster en Tecnología y Ciencia Cerámica. Postgrado a distancia Funiber: <http://ti.cicei.ulpgc.es>.
- [3] Elias, X. (2002). 'Secado y tratamiento de fangos de EDAR'. Tecnología del Agua.
- [4] Elias, X. (1994). 'Materiales cerámicos para la construcción fabricados con lodos de estaciones depuradoras: Ecobricks'. Conferencia Anual Ategrus (Madrid), Libro de Conferencias, págs. 89-101.
- [5] Elias, X. (2009). 'Reciclaje de residuos industriales. Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora'. Ed. Díaz de Santos.
- [6] European Commission DG Env. (2001). 'Pollutants in urban waste water and sewage sludge'.
- [7] Borsa de Subproductes de Catalunya (1998). 'Nuevas vías de valorización de fangos'. Exporecycling'98, II Forum Ambiental.

Tabla 5. Análisis elemental de algunos fangos de EDAR.

Tipo de fango	%C	%H	%N	%O	%Cl	%S
Digerido P+S	34,1	4,1	5,7	16,2	1,0	2,0
Digerido P+S	38,3	4,9	1,8	22,4	0,8	1,9
Digerido P+S	32,2	3,9	4,9	14,8	0,8	2,0
Digerido P+S	40,6	5,3	5,7	18,8	0,8	1,9
Sin digerir P+S	38,0	3,4	2,9	24,3	0,8	-
Sin digerir P+S	27,9	4,0	2,0	18,3	0,5	0,1
Sin digerir P+S	50,0	7,0	4,8	15,0	0,1	0,9
Sin digerir P+S	45,6	6,4	4,1	11,7	-	0,7

Tabla 6. Especificaciones de fangos de EDAR.

Tipo de fango	% de combustible	PCI kcal/kg
Fango primario de EDAR	-	5.280
Fango digerido anaerobiamente	-	3.060
Primario (precipitación química)	-	3.920
Fracción grasas y espumas	88	9.280
Sólidos precipitados químicamente	57	4.150
Fracción arenosa	33	2.230
Sin digerir P+S	50,0	7,0
Sin digerir P+S	45,6	6,4