

RECUPERACIÓN ENERGÉTICA A TRAVÉS DE LA ESTABILIZACIÓN Y DIGESTIÓN DE FANGOS DE DEPURACIÓN

MORALES POLO, Carlos⁽¹⁾; MORATILLA SORIA, B. Yolanda⁽¹⁾; CLEDERA CASTRO, María del Mar⁽¹⁾

cmorales@upcomillas.es

⁽¹⁾Universidad Pontificia de Comillas, Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI, Cátedra Rafael Mariño.

RESUMEN

Los fangos de depuración son un residuo resultado de la compactación de la contaminación retirada del agua durante el proceso de depuración. Toda la materia orgánica (contaminación, microorganismos, patógenos...) se encuentra “activa”, por ello se hace necesaria la estabilización, es decir, llevar a estado inerte la materia orgánica [1].

Las dos estabilizaciones fundamentales son procesos de digestión biológica, aerobia y anaerobia. La digestión anaerobia, en ausencia de aire, elimina la materia contaminante produciendo el digestato (o fango digerido) y biogás [2]. La digestión aerobia, en presencia de aire, elimina la materia contaminante produciendo digestato y liberando calor [1].

Ambas estabilizaciones generan un subproducto potencial para recuperación energética: Biogás y calor. En caso de que se aprovechen estos recursos puede transformarse el concepto de EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales), y pasar además de ser una planta depuradora a ser una planta generadora de energía.

En el caso de la digestión anaerobia, la recuperación energética es evidente, se puede aprovechar el biogás como gas combustible para generación térmica en calderas, eléctrica en motores de combustión, o incluso para cogeneración [1,2].

Para la digestión aerobia, la recuperación es un tema menos tratado. Normalmente se utiliza el calor generado para autoalimentar el proceso y conseguir que este sea más rápido. Es lo que se conoce como proceso ATAD (Digestión Aerobia Termófila Autosostenida) [1]. Sin embargo el calor desprendido es una fuente potencial que puede ser aprovechada de múltiples maneras, con bombas de calor, en intercambiadores de calor...

El objetivo de este estudio es analizar todas las vías posibles de recuperación energética, cuantificar las operaciones y conseguir así cambiar el concepto de depuradora, dándole un valor añadido a una planta necesaria medioambientalmente y de obligada presencia por ley, convirtiéndola en, además, planta generadora de energía útil.

Palabras clave: Recuperación energética, Depuración, Digestión de fangos.

1. Introducción. Producción y características de los fangos.

La depuración de aguas residuales es una operación necesaria y obligada [3], tanto desde el punto de vista técnico como ambiental. El objetivo fundamental es eliminar la contaminación de los efluentes líquidos provenientes de actividades industriales o urbanas, para posteriormente verterlos de forma segura al exterior.

Lógicamente, toda la contaminación retirada no desaparece, se transforma en fango de depuración. Un residuo que debe verse como subproducto con alto potencial de aprovechamiento, sobre todo desde el punto de vista energético.

Una EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) consta de dos líneas fundamentales, la línea de agua y la línea de fangos, tal y como se aprecia en la Figura 1.



Figura 1: Diagrama de flujo de una EDAR.

La línea de agua es la que transporta el agua residual a lo largo del proceso de transformación, entrando como agua contaminada y abandonando la planta como agua admisible para vertido al exterior. [4]

Toda la contaminación retirada del agua se extrae en forma de “barro”, conocido como fango de depuración. Este fango estaba visto anteriormente como un residuo a eliminar. Sin embargo, hoy en día, el concepto de depuradora está cambiando ya que se trata de aprovechar la producción de fangos, una operación inevitable, como medio energético, de reciclaje...

La línea de fangos es la encargada de procesar este fango, para que sea eliminado de forma segura, sin que constituya ni un peligro ni riesgo sanitario.

Las fases necesarias en una línea de fangos son: El espesamiento, cuyo objetivo es reducir el volumen del fango, concentrándolo y retirando agua del mismo (El fango nada más ser retirado está formado en un 95% por agua). Seguidamente es sometido a estabilización para destruir y/o transformar la materia orgánica del fango, evitándose así que fermente y constituya un residuo peligroso. Finalmente se somete a deshidratación, para eliminar el agua restante y hacerlos más manejables como residuo. [4]

1.1 Tipos y características de los fangos

El tipo de fango, su composición y características dependen del agua residual tratada y del tipo de contaminación a eliminar, por lo que son muy dispares. No puede compararse la contaminación de una operación industrial que un efluente de agua residual urbana.

Atendiendo a la clasificación según el origen en la línea de tratamiento de agua, pueden destacarse dos tipos, los fangos primarios y los fangos secundarios (biológicos en exceso).

- Los fangos primarios proceden de la decantación primaria y están formados por todos aquellos sólidos en suspensión que se eliminan por efecto de la gravedad en un sedimentador. Estos son muy inestables y putrescibles, ya que la contaminación eliminada no ha sido sometida a ningún tratamiento previo de estabilización o adecuación.
- Los fangos secundarios, o biológicos en exceso, se generan en el tratamiento biológico y se recogen en la decantación secundaria. Este fango está constituido por flóculos resultado de la acción metabólica de las bacterias encargadas de la depuración. Este fango contiene gran

cantidad de materia orgánica parcialmente estabilizada (por la acción de los microorganismos encargados de la depuración).

Para justificar la estabilización de fangos es necesario analizar las características de los fangos:

Químicamente, los fangos se componen por materia orgánica (grasas, proteínas, hidratos de carbono y fibras) y nutrientes, junto con materia inorgánica (cenizas).

Tabla 1: Composición química de fangos de depuración. Fuente: [5]

	Fango primario	Fango secundario
Proteínas [%]	20.80	46.10
Grasas [%]	18.20	5.80
Carbohidratos [%]	31.70	29.80
Fibras [%]	23.40	0.40
Cenizas [%]	29.30	18.30
Nitrógeno [%]	2-3	3-6
Fósforo [%]	3-6	3-7

En cuanto a las características biológicas de los fangos de depuración, estos se diferencian claramente en primarios y secundarios.

Los fangos primarios presentan una gran variedad de microorganismos como bacterias, virus, parásitos, algas, hongos... que provienen del intestino humano (En el caso de las ARU (Agua Residual Urbana)) o de actividades industriales como las de matadero, por ejemplo. Los secundarios, por su parte, contienen microorganismos de tipo selecto y dependiente del proceso biológico empleado.

Dada la alta cantidad de microorganismos, en especial de virus, las características patológicas del fango justifican su estabilización, para eliminarlos y asegurar que no existe riesgo sanitario. La Comisión Europea, mediante el estudio CO 5026/1 *Evaluation of sludgetreatmentforpathogenreduction* propone una serie de curvas temperatura-tiempo para la correcta eliminación de patógenos de forma aerobia, en un lodo virtual. [6]

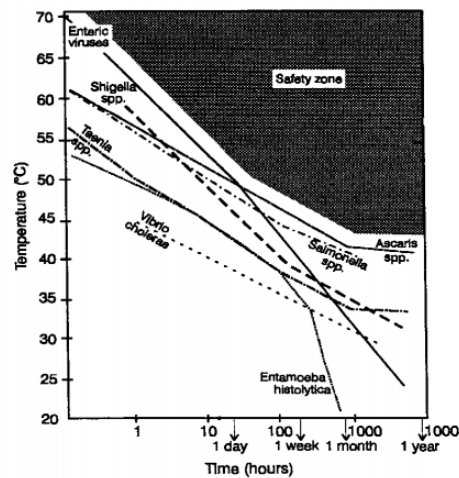


Figura 2: Curvas temperatura tiempo para producir un fango virtual libre de patógenos. Fuente: [7]

2. Criterios y necesidad de estabilización

Estudiadas las características de los fangos, debido al gran contenido de materia orgánica activada (y su derivada putrescibilidad, que generará olores) y el riesgo proveniente de la composición patológica, queda justificada la estabilización del fango. Gracias a ella podrá ser tratado de forma segura como residuo o como subproducto fertilizante, combustible potencial...

El criterio de estabilidad es uno de los más divergentes en cuanto a normativa. Si bien prácticamente todas se centran en mineralizar la materia orgánica y eliminar patógenos, la forma de cuantificarlo es muy diferente.

Como ejemplo, las normas EPA (1979) y EPA (2003) emplean como indicadores de estabilidad la reducción total de patógenos y la eliminación de SV (Sólidos volátiles) como parámetro de mineralización de materia orgánica. Según dicha normativa, un fango se considera estabilizado cuando se han eliminado los patógenos y se han reducido los SV en un 38%.

3. Recuperación energética a través de la estabilización de fangos.

Dado que una depuradora es una instalación de obligada presencia, y la estabilización de fangos necesaria para la segura evacuación de este residuo, parece interesante plantear una recuperación energética de este modo, aprovechando el mecanismo de la estabilización o digestión.

3.1 Digestión Aerobia de fangos

La digestión aerobia de fangos es un proceso biológico mediante el cual la m.o. (Materia Orgánica) se mineraliza por acción metabólica de bacterias aerobias. Esto es que, con un aporte energético en forma de O_2 , las bacterias llevan a cabo su acción metabólica, consumiendo m.o. y produciendo un residuo inerte (en este caso fango estabilizado).

Como consecuencia del balance energético, además de la materia digerida, se produce un aporte de calor, tal y como se muestra en la Figura 3:

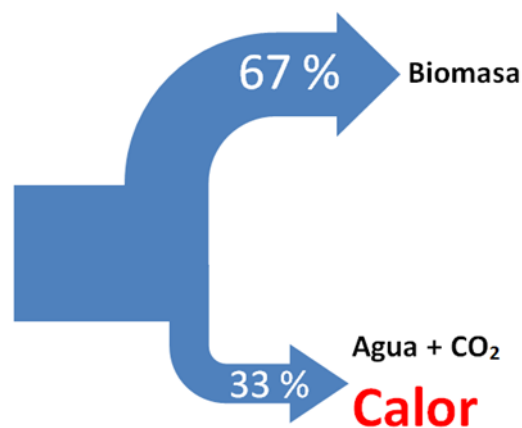


Figura 3: Diagrama de eliminación de m.o. mediante digestión aerobia.

Dado que se elimina el 33% de la materia orgánica procedente del fango, y se produce calor, parece interesante aprovechar dicho calor como fuente potencial de energía mediante intercambiadores de calor, bombas de calor...

Industrialmente, el calor se utiliza para autoalimentar el digester aerobio y de esta manera provocar que trabaje en estado termófilo (Temperatura mayor de 55 °C). En este estado el proceso se vuelve mucho más eficiente, pero requiere un mayor aporte energético para mantener la temperatura.

Este proceso se conoce como ATAD (Autothermal Thermophilic Aerobic Digestion).

Para dar una idea del calor biológico generado durante la estabilización, y del calor sobrante aprovechable, se presentan a continuación una serie de cálculos preliminares:

Cálculos del balance de calor en un digestor aerobio estabilizando fango de depuradora

En primer lugar, se ha de acudir a los criterios de estabilidad de fango. En este caso la reducción de la fracción volátil no es un problema, ya que con el aporte de oxígeno es más que suficiente. El problema se presenta en cuanto a la eliminación de patógenos. De esta manera, a través de la gráfica de la Figura 1 se obtiene el tiempo de retención necesario del fango dentro del digestor, en función de la temperatura de funcionamiento.

El calor biológico generado puede calcularse a través de la fórmula:

$$Q_{biológico} = m_{DQO\ eliminada} \cdot \frac{Y_{O_2}}{T - T_0}$$

Siendo Y_{O_2} un coeficiente de producción de calor por kilogramo de materia orgánica consumida, para una temperatura de funcionamiento de 50°C. [8]

Para los cálculos se ha tomado una depuradora de fangos activos, que recibe al día 1570.55 kg de DBO₅ diarios con un peso de biomasa en el reactor de 1.8 gramos por litro de licor mezcla, trabajando en regímenes de baja carga ($\eta=93\%$), media carga ($\eta=90\%$) y alta carga ($\eta=70\%$).

Tabla 2: Balance para un digestor aerobio que recibe fango de una depuradora de baja carga.

T [°C]	tr [días]	Y corregido	Q biológico [MJ]	Q necesario [MJ]	Q EXCESO [MJ]
45	30	12,17	0,00	5496,24	-5496,23
50	3,75	14,60	0,01	824,44	-824,42
55	1	17,03	0,05	256,49	-256,44
60	0,375	19,47	0,15	109,92	-109,78
65	0,083	21,90	0,84	27,48	-26,64
70	0,021	24,33	7,10	7,63	-0,53

Tabla 3: Balance para un digestor aerobio que recibe fango de una depuradora de media carga.

T [°C]	tr [días]	Y corregido	Q biológico [MJ]	Q necesario [MJ]	Q EXCESO [MJ]
65	0,083	21,90	0,87	26,60	-25,72
70	0,021	24,33	7,64	7,38	0,25

Tabla 4: Balance para un digestor aerobio que recibe fango de una depuradora de alta carga.

T [°C]	tr [días]	Y corregido	Q biológico [MJ]	Q necesario [MJ]	Q EXCESO [MJ]
65	0,083	21,90	1,17	20,68	-19,51
70	0,021	24,33	15,66	5,74	9,92

Como puede observarse, con unos cálculos preliminares, sin tener en cuenta las pérdidas de calor que sufriría el digestor, únicamente podría aprovecharse una mínima parte del calor generado en digestión aerobia termófila, de ahí que la única aplicación industrial que tenga sea la ATAD.

Queda de esta forma descartada la recuperación energética a través de la estabilización aerobia.

3.2 Digestión Anaerobia de fangos

La digestión anaerobia de fangos es un proceso biológico mediante el cual la m.o. (Materia Orgánica) se mineraliza por acción metabólica de bacterias anaerobias, consumiendo m.o. y produciendo un residuo inerte (en este caso fango estabilizado o digestato).

Como consecuencia del metabolismo de la comunidad anaerobia, además de la materia digerida, se produce como subproducto biogás, una mezcla de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), tal y como se muestra en la Figura 4:

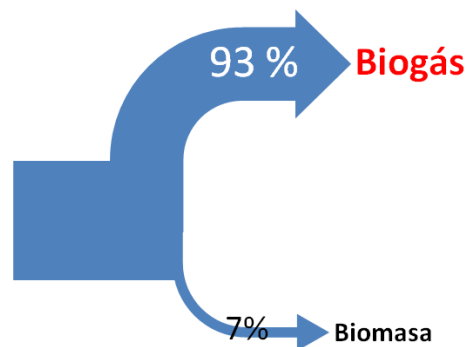


Figura 4: Diagrama de eliminación de m.o. mediante digestión anaerobia.

Es decir, mediante digestión anaerobia se elimina el 93% de la materia orgánica, quedando únicamente remanente un 7% de biomasa activa. Por lo que es una estabilización mucho más efectiva que la aerobia.

La gran ventaja es la formación de biogás, con un alto contenido en metano. El proceso anaerobio es tremendamente complejo y delicado (Figura 5), ya que es muy sensible a factores externos y compositivos (pH, temperatura, tamaño de grano del sustrato...), pero con un buen control puede alcanzarse un estado estacionario estable y duradero.

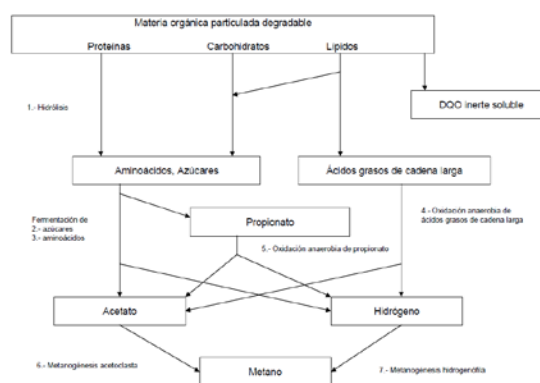


Figura 5: Proceso de digestión anaerobia. Fuente: [9]

El biogás producido, tiene una composición aproximada en metano del 55-75%, en CO_2 del 25-45 % y otros gases en menor cantidad (H_2S 0.01-1%, N_2 , H_2 ...) [6] Lo que le confiere un poder calorífico de 18.8-23.34 MJ/m^3 .

Cálculos del balance de calor en un digestor anaerobio estabilizando fango de depuradora

En primer lugar, se ha de acudir a los criterios de estabilidad de fango. En este caso la eliminación de patógenos no es inconveniente, se ha de analizar la reducción de volátiles. Cada fango es diferente, pero, como muestra de una digestión anaerobia de fango urbano se muestra la siguiente figura, con el tiempo de retención necesario para la eliminación de volátiles, y la producción específica esperada de gas.

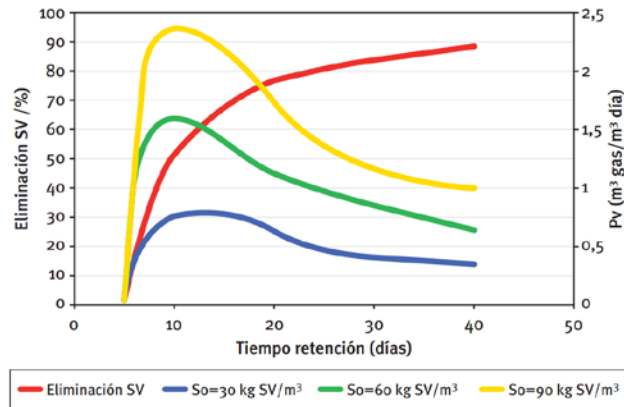


Figura 6: Eliminación de volátiles y producción específica de gas para un fango urbano. Fuente: [10]

Para cumplir con normativa, el tiempo de retención necesario sería 9 días, pero se suele tener 15 días como valor típico para maximizar la producción de gas. A continuación se muestran unos cálculos para la misma depuradora anterior. Se ha supuesto que el fango entra a 20°C en el digestor, se opera en condiciones mesófilas (35°C), el digestor de hormigón se encuentra parcialmente enterrado en un terreno a 6°C y que el aire exterior presenta una temperatura de -6°C. De tal manera que se maximizan las pérdidas de calor en la virola, en la cúpula y en la superficie enterrada.

Tabla 5: Balance para un digestor anaerobio mesófilo que recibe fango de una depuradora urbana.

	Temperatura funcionamiento [°C]	tiempo retención [días]	Q generado [MJ]	Q necesario [MJ]	Q EXCESO [MJ]
Baja carga	35	15	2745.75	65.63	2680.05
Media carga	35	15	2745.75	63.03	2682.71
Alta carga	35	15	2745.75	58.91	2686.83

Como puede apreciarse, en el caso de la digestión anaerobia si puede emplearse como fuente generadora de energía útil, ya que después de cubrir las necesidades de calentamiento del digestor, el biogás sobrante podrá utilizarse para cualquier otro uso de la planta depuradora o exterior.

Los datos empleados de producción de biogás se han extraído de una serie de experimentos preliminares llevados a cabo en la Universidad Pontificia de Comillas. El fin último de estos ensayos es analizar experiencias de co-digestión. La co-digestión consiste en la digestión, no solo de fangos de depuración, si no de otros muchos residuos que incrementen la producción de biogás.

Al mezclar varios residuos, la producción de biogás no se ve aumentada por el hecho de existir más sustrato, si no que se crea una sinergia entre elementos que aumenta enormemente la producción. Para una adecuada digestión se necesita un balance de nutrientes óptimo, y la co-digestión, por la mezcla de elementos, ayuda a equilibrar el balance de nutrientes (Por ejemplo, si un lodo de depuración carece de nitrógeno, se complementará con un sustrato de alto contenido en nitrógeno como pueden ser los purines).



Figura 7: Experimentos propios de digestión y co-digestión con fango urbano.

4. Conclusiones

- Las estaciones depuradoras de aguas residuales constituyen una fuente potencial de recuperación energética si se utilizan correctamente las etapas de estabilización biológica de fangos.
- La digestión aerobia estabiliza correctamente el fango produciendo calor residual, pero que, desde el punto de vista de la estabilización, únicamente puede ser usado para autoalimentar el digester y operar en estado termófilo.
- La digestión anaerobia, por su parte, constituye un método de estabilización excepcional, que además conlleva la producción de biogás, que puede ser utilizado como fuente de energía externa (incluyendo las necesidades de calentamiento del digester).
- La DA (Digestión anaerobia) abre las puertas de la co-digestión, que aumenta enormemente la producción de biogás con la simple adición de nuevos sustratos. Permitiendo dar solución a la gestión de distintos residuos, generando energía.

5. Referencias

- [1] METCALF & EDDY, *Wastewater Engineering. Treatment and Resource Recovery. Fifth Edition, Volumes 1 and 2*. New York: McGraw-Hill International, 2014. 2018 p.
- [2] DE LEMOS, C.A. *Anaerobic Reactors. Biological Wastewater Treatment Series Volume 4*. London: IWA Publishing, 2007. 175 p.
- [3] COMISIÓN EUROPEA, *Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas*.
- [4] SOBRADOS BERNARDOS, L. *Producción y características de los fangos*. Madrid:CEDEX, 2014, 22 p.
- [5] GOMEZ, M.V. et al., *Effect of sludge composition on the degree of stabilisation and gas production during mesophilic anaerobic digestion*. European Biosolids and Organic residuals conference, 2003, vol. 8, pp. 24-28.
- [6] SOBRADOS BERNARDOS, L. et al., *Criterios para la aplicación de fangos de depuradora en suelos: Estabilidad e higienización*. Madrid:CEDEX, 2005, 128 p.
- [7] COMISIÓN EUROPEA, *Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction CO 5026/1*.
- [8] JEWELL W.J., *Autoheated Aerobic Thermophilic Digestion with Air Aeration*. EPA Project No. R 804636, MERL Report, NTIS PB-82-196908.
- [9] GUJER, J.W. et al. *Conversion process in anaerobic digestion*. Water Science and Technology, 1983, vol. 15, pp. 127-167.
- [10] IDAE, *Biomasa: Digestores Anaerobios*, Madrid: IDAE, 2007, 48 p.