

PRINCIPIOS PARA EL DISEÑO Y APLICACIÓN DE REACTORES ANAEROBIOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

Maikel Fernández Boizán, Suyén Rodríguez Pérez, Adis Terry Brown
Centro de Estudio de Biotecnología Industrial, Universidad de Oriente

En la actualidad, existen un gran número de industrias que vierten sus aguas residuales al medio ambiente, causando la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. En los últimos años, se ha notado un marcado interés en la digestión anaerobia, como una de las alternativas de tratamiento más atractivas, debido a las ventajas que ésta posee desde el punto de vista energético y económico. Nuestro país posee un gran número de industrias que generan aguas residuales, que pueden ser tratadas empleando sistemas de tratamiento anaerobios, por lo que en este artículo se hace un análisis sobre los principales parámetros ambientales y ensayos biológicos, que deben tenerse en cuenta para lograr diseñar y aplicar con éxito reactores anaerobios de alta carga en el tratamiento de estas aguas.

Palabras clave: *tratamiento anaerobio, aguas residuales industriales.*

At the present time, there are a great number of industries that deliver their wastewaters at the environment, causing pollution of the superficial and underground waters. In the last years, anaerobic digestion technology has received attention as attractive alternative to wastewater treatment because it has advantages, since energetic and economic point of view. Our country has many industries that generate wastewaters, which could be treated using anaerobic processes and for this reason, in this article it is made an analysis about the main environmental parameters and biological assays, that should be applied to design and build anaerobic reactors successfully to the treatment of the industrial wastewaters.

Key words: *anaerobic treatment, industrial wastewaters.*

Introducción

La digestión anaerobia es una de las tecnologías más antiguas, usada desde comienzos del siglo XIX en el tratamiento de aguas residuales domésticas en los denominados tanques sépticos, y en el tratamiento de los lodos residuales de plantas de tratamiento aerobio. /1/ Este proceso posee como ventajas principales que no necesita de aireación como los procesos aerobios, los requerimientos de nutrientes son bajos, genera un gas de alto contenido energético (biogás) y el efluente y los lodos pueden emplearse en la fertilización de cultivos agrícolas. /2/ Debido a la crisis internacional del petróleo y con la necesidad de encontrar sistemas de tratamiento eficientes y de bajo costo, en la década del 70 ocurrió el descubrimiento más importante en el campo de la digestión anaerobia: la introducción de los reactores anaerobios de alta carga. Dentro de este grupo de reactores, en los cuales el tiempo de retención hidráulico (TRH) es independiente del tiempo de retención de sólidos (TRS), se han desarrollado

varios diseños, siendo el más empleado el reactor de flujo ascendente con manto de lodos (UASB); /3/ el cual se caracteriza por la formación de conglomerados granulares de microorganismos anaerobios con una alta sedimentabilidad, lo que posibilita alcanzar altos TRS. /4, 5/

En nuestro país, la digestión anaerobia ha sido mayormente usada en el tratamiento de residuos sólidos agrícolas como las excretas de animales de corral y cachaza; aun cuando existe un gran número de industrias generadoras de aguas residuales con alto contenido de materia orgánica como las destilerías de ron, despulpadoras de café, fábricas de levadura torula, centrales azucareros, industria láctea, entre otras. Generalmente, estas industrias tratan sus efluentes en sistemas de lagunas que no siempre cumplen con los parámetros de diseño, y que además, generan, durante la descomposición de la materia orgánica, olores desagradables y gases como el metano, que contribuyen al fenómeno de efecto invernadero.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar los principales ensayos que deben realizarse para poder diseñar y aplicar reactores anaerobios de alta carga en el tratamiento de aguas residuales.

Desarrollo

Antes de comenzar cualquier diseño de un reactor anaerobio para el tratamiento de un agua residual, deben ser evaluados una serie de parámetros ambientales que influyen en el proceso de digestión anaerobia. /6/ Además, se deben realizar ensayos biológicos que permitan estimar la viabilidad del tratamiento anaerobio. /7/

Parámetros ambientales

Los principales parámetros ambientales que se deben determinar se detallan a continuación:

Temperatura

El efecto de la temperatura es de gran importancia para el desarrollo de la digestión anaerobia, ya que ésta altera la actividad de las enzimas, y por tanto, varía la velocidad del proceso de digestión. Las temperaturas óptimas para el desarrollo de este proceso están entre 30–40 °C para el

rango mesófilo, y alrededor de 55 °C para el rango termófilo. /8, 9/ En nuestro país, este parámetro tiene un comportamiento promedio cercano a los 30 °C, por lo que no constituye un problema como en los países de clima frío o templado. /10/

Demanda Química de Oxígeno (DQO) total y soluble

El análisis de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se emplea para medir el contenido de materia orgánica de las aguas residuales, como indicador de la carga contaminante por tratar, /11/ de ahí que resulta importante realizarlo previo y durante el tratamiento anaerobio. Éste constituye un parámetro fundamental para monitorear el proceso, pues permite calcular la eficiencia del tratamiento y determinar el volumen del reactor según la Velocidad de Carga Orgánica (VCO), empleando la siguiente ecuación:

$$V_r = (C \times Q) / VCO$$

donde:

V_r : volumen de reactor (m³);

C: DQO del agua residual (kg/m³);

Q: flujo del agua residual (m³/d);

VCO: velocidad de carga orgánica de diseño (según la tabla 1) (kg/m³d)

Tabla 1
Velocidad de carga orgánica promedio en reactores UASB según las características del agua residual y la temperatura de trabajo /12/

Temperatura (°C)	VCO (kg DQO/m ³ reactor /día)			
	Totalmente acidificado (solo AGV)	No acidificado (sin AGV)	? 5 % Sólidos suspendidos (SS)	30-40 % Sólidos suspendidos (SS)
15	2 - 4	1,5 - 3	2 - 3	1,5 - 2
20	4 - 6	2 - 4	4 - 6	2 - 3
25	6 - 12	4 - 8	6 - 10	3 - 6
30	10 - 18	8 - 12	10 - 15	6 - 9
35	15 - 24	12 - 18	15 - 20	9 - 14
40	20 - 32	15 - 24	20 - 27	14 - 18

pH y Ácidos Grasos Volátiles (AGV)

El valor y estabilidad del pH son extremadamente importantes en un reactor anaerobio, debi-

do a que la metanogénesis ocurre de forma óptima cuando el pH se mantiene cercano al neutro. A valores de pH menores que 6,3 y mayores de 7,8, la velocidad de la metanogénesis disminuye nota-

blemente. El pH operacional resultante depende completamente de la composición y el grado de acidificación del agua residual en particular, por lo que se hace necesario determinar los AGV para saber qué porción de la DQO representan, si están en concentraciones inhibitorias, y la cantidad de álcalis que se debe añadir para trabajar a pH cercanos al neutro durante la operación del reactor. /13/

Contenido de sólidos suspendidos totales

La cantidad de sólidos suspendidos de un agua residual es uno de los criterios decisivos para seleccionar el tipo de reactor anaerobio por emplear. Las aguas residuales más concentradas, con DQO superiores a los 5 g/L y con concentraciones de sólidos suspendidos mayores a un 40 % de la misma, son generalmente tratadas en reactores anaerobios de mezcla completa (CSTR), o en procesos anaerobios de contacto. /3/ Las aguas residuales con sólidos suspendidos menores que el 40 % de su DQO, pueden ser tratadas por sistemas UASB, teniendo en cuenta la temperatura de operación y la biodegradabilidad de estos sólidos. /12/

Fósforo y nitrógeno total

El crecimiento bacteriano requiere como macronutrientes principales el nitrógeno y el fósforo, así como de micronutrientes consistentes en metales pesados y elementos trazas. En la mayoría de las aguas residuales industriales, la cantidad de micronutrientes es suficiente, por lo que se ha de prestar atención a las cantidades de macronutrientes.

Según Lettinga *et al.*, (1983)/14/ las relaciones promedios de (DQO: nitrógeno: fósforo) que deben emplearse son:

DQO: N : P = 1 000 : 5 : 1 para aguas residuales totalmente acidificadas (AGV).

DQO: N : P = 350 : 5 : 1 para aguas residuales no acidificadas (Ej.: azúcares).

Los requerimientos de nutrientes para aguas residuales no acidificadas se calculan de acuerdo con las siguientes expresiones:

$N: Q \times ((DQO \times f_{\text{biodr.}} \times n\text{-a} / 350 \times 5) + (DQO \times f_{\text{biodr.}} \times a / 1\,000 \times 5)) - N_{\text{infl}} = \text{kg N/d}$

$P: Q \times ((DQO \times f_{\text{biodr.}} \times n\text{-a} / 350 \times 1) + (DQO \times f_{\text{biodr.}} \times a / 1\,000 \times 1)) - P_{\text{infl}} = \text{kg P/d}$

donde:

Q: flujo del agua residual (m³/d);

DQO: concentración de la DQO en el influente;

$f_{\text{biodr.}}$: fracción biodegradable de la DQO (entre 0-1);

n-a: fracción no acidificada de la DQO en el influente (entre 0-1);

a: fracción acidificada de la DQO en el influente (entre 0-1);

N_{infl} : concentración total de nitrógeno en el influente (por el método de Kjeldahl);

P_{infl} : concentración total de fósforo.

Debe resaltarse, que el nitrógeno y el fósforo no son removidos por los sistemas anaerobios, exceptuando la porción que se consume para el crecimiento bacteriano. En muchos casos, se observa un incremento de la concentración de estos elementos debido a los procesos de mineralización bacteriana, lo cual se puede considerar como favorable si se prevé el uso del efluente en el fertirriego de cultivos agrícolas.

Contenido de sulfatos

La presencia de altas concentraciones de sulfato en numerosos residuales industriales, ha sido considerada como un inconveniente para proceder a su tratamiento anaerobio. En presencia de este ion se establece una competencia entre las bacterias productoras de metano y las bacterias sulfato-reductoras por los sustratos comunes H₂, CO₂ y acetato /15/; con la consiguiente producción de sulfuro de hidrógeno en vez de metano. Esto implica un menor rendimiento energético del biogás obtenido como subproducto de la digestión anaerobia, así como los problemas derivados del carácter corrosivo y tóxico del sulfuro de hidrógeno.

La relación DQO: sulfato es un importante parámetro de control en el tratamiento anaerobio de aguas residuales. Tradicionalmente, se ha operado en relaciones mayores de 50, aunque se considera viable con valores por encima de 10. Se ha descrito que con valores inferiores, puede comenzar a fallar la metanogénesis. /16/

Ensayos biológicos

Ensayo de biodegradabilidad anaerobia

Existen varios tipos de aguas residuales que son

parcialmente degradables, por ejemplo, las que tienen un alto contenido de lignina /17/, por lo que se necesita probar a escala de laboratorio la máxima biodegradación que se puede alcanzar por vía anaerobia, antes de diseñar un reactor anaerobio.

Para realizar este ensayo, se debe incubar una muestra de agua residual promedio con lodo anaerobio activo y añadir nutrientes, en caso de que sea necesario. Durante la incubación en lotes a largo plazo, se evalúa la DQO, que es convertida a metano. La diferencia entre la DQO añadida y la remanente al final del experimento es la cantidad de DQO bioconvertida, que refleja la biodegradabilidad anaerobia del agua residual /18, 19/. En esta prueba, se debe tener en cuenta la biodegradabilidad de los sólidos suspendidos del residual, ya que esto puede afectar la producción de lodos en los reactores UASB a escala industrial.

Ensayo de toxicidad del agua residual

Las aguas residuales industriales pueden contener compuestos tóxicos (compuestos clorados, metales pesados, entre otros), que afectan el proceso de digestión anaerobia, por lo que se debe realizar previo al tratamiento un ensayo de toxicidad /20/. El grado de toxicidad de un agua residual se evalúa con varias diluciones de la misma en orden ascendente, que son incubadas con lodo anaerobio activo y suplementado con nutrientes. Los resultados son comparados con un control en lote, en el cual se ensaya la actividad de mismo lodo con una mezcla de ácidos grasos volátiles.

Ensayos pilotos

Para cualquier agua residual que no haya sido tratada anteriormente por vía anaerobia, se realizan los ensayos pilotos para ganar experiencia práctica en condiciones de flujo continuo. Estos ensayos permiten obtener los siguientes resultados:

- Máxima carga orgánica volumétrica alcanzable (en kg de DQO/m³ de reactor/d).
- Máxima carga másica en relación con el lodo anaerobio (en kg DQO/kg SSV * d).
- Máximo valor de remoción de la DQO.
- Desarrollo de la cama de lodos en término de actividad metanogénica específica, sedimentabilidad, relación SSV/SST, adaptabilidad en el tiempo, mag-

nitud de la granulación y densidad del lodo. (Para reactores UASB).

Conclusiones

Desde los años setenta, la digestión anaerobia ha experimentado un excelente crecimiento en la investigación y la aplicación a escala industrial, particularmente, en el tratamiento de efluentes industriales y en menor grado, de las aguas residuales municipales (principalmente en los países tropicales). Además, como resultado de lo anterior se han establecido un gran número de plantas de biogás sobre todo en el norte de Europa, donde se combinan los residuales de la agricultura, la industria y los domésticos para producir biogás y un fertilizante líquido que se emplea en el riego de los cultivos agrícolas. /16, 20-22/

Nuestro país posee un gran número de residuos líquidos provenientes de la industria, que pueden ser tratados mediante digestión anaerobia para reducir su carga contaminante y a la vez, poder utilizar el biogás como fuente renovable de energía en sustitución de las fuentes de energía convencionales empleadas en la cocción de alimentos y la generación de energía eléctrica. Para implementar con éxito esta tecnología se recomienda tener en cuenta las pruebas antes mencionadas, facilitando la selección, el diseño y el escalado de los reactores anaerobios que la sustentan.

Bibliografía

1. Van Lier, J. *et al.*, "New Perspectives in Anaerobic Digestion, *en Wat. Sci. Tech.* vol. XLIII, núm. 1, 2001, págs. 1-18.
2. Rodríguez, S.; Terry, A.; Izquierdo, J.; Bermúdez R. C., "Utilización de lodos anaerobios como bioabonos", *en Agricultura Orgánica*, Año 9, núm. 1, 2003, págs. 19-21.
3. Montalvo, S.; Guerrero, L., "Tratamiento anaerobio de residuos. Producción de Biogás", Universidad Técnica. Federico Santa María. Chile. 2003.
4. Bermúdez, R. C., Rodríguez S., Martínez M. C., Terry A. I., "Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogás", *en Tecnología Química*, vol. XXIII, núm. 2, 2003, págs. 37-44.

-
5. McHugh, S. *et al.*, "Anaerobic Granular Sludge Bioreactor Technology", en *Environmental Science and Biotechnology*, vol. II, 2003, págs. 225-245.
 6. Cervantes, F. J.; Pavlostasthis, S. G.; van Haandel, A. C., "Advanced Biological Treatment Processes for Industrial Wastewater", *IWA Publishing*, UK, 2006.
 7. Colleran, E.; Pender, S., "Anaerobic Biodegradability, Methanogenic Activity And Toxicity Test Systems: Defining the Test Conditions", *Proceedings, Workshop on Harmonization of Anaerobic Biodegradation, Activity and Inhibition Assays*, Italia, 2002.
 8. Henzen, M.; Harremoes, P. "Anaerobic Treatment of Waste Water in Fixed Film Reactors: a Literature Review", en *Wat. Sci. Techn.*, vol. XV, núm. 1, 1983.
 9. Zabranzca, J. *et al.*, "The Activity of Anaerobic Biomass in Thermophilic and Mesophilic Digester at Different Loading Rates", en *Wat. Sci. Tech.*, vol. XLII, núm. 9, 2000, págs. 49-56.
 10. Von Sperling, M.; Chernicharo, C. A. L., "Wastewater Treatment in Warm Climates", *IWA publishing*, UK, 2005.
 11. APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th edition, Washington D. C, USA: 1124. 1998.
 12. Letinga, G.; Hulshoff, W., "UASB-process Desing for Various Types of Wastewaters, *Wat. Sci. Tech.*, vol. XXIV, núm. 8, 1991, págs. 87-107.
 13. Pind, P. F.; Angelidaki, I.; Ahring, B., "Dynamics of the Anaerobic Process: Effects of Volatile Fatty Acids", en *Revista electrónica Wiley InterScience*, 2003.
 14. Letinga, G. *et al.*, "Anaerobic Waste Water Treatment Using the UASB-Treatment Process", en *Biotechnion*, Universidad Agrícola de Wageningen, Departamento de Contaminación Ambiental, Holanda, 1983.
 15. Bonilla, M., Aislamiento y caracterización de bacterias que utilizan tiosulfato, Tesis para obtener el grado de Máster en Biotecnología, UAM, México D. F., 1999.
 16. Méndez, D., Toxicidad y biodegradación anaerobia de formaldehído, Tesis de doctorado, Universidad de Santiago de Compostela, España. 1997
 17. Feijoo G.; Lema J. M., "Tratamiento de efluentes de industrias de la madera con compuestos tóxicos y recalcitrantes mediante hongos ligninolíticos", en *AFINIDAD LIV*, 1999, págs. 171-180.
 18. Soto, M.; Méndez, R.; Lema, J., "Determinación de toxicidad y biodegradabilidad anaerobia de aguas residuales", en *Tecnología del Agua*, No. 92, 1992, págs. 70-80.
 19. Guwy, A., "Equipment Used for Testing Anaerobic Biodegradability and Activity", Review in *Environmental Science and Biotechnology*, vol. III, 2004, págs. 131-139.
 20. Kleerebezem, R.; Macarie, H., "Treatment Industrial Wastewater: Anaerobic Digestion Comes of Age", en *Chemical engineering www.che.com*, vol. cx, núm. 4, 2003.
 21. Totzke, D. E., "Anaerobic Treatment overview. Anaerobic Treatment of High Strength Agricultural and Industrial Wastes", en *Lecture Organized by the University of Wisconsin*, March 11-12, 1999, San Francisco, California, USA, 14 págs.
 22. Hulshoff Pol.; Euler, H.; Eitner, A.; Grohganz, D., "GTZ Sectoral Project, Promotion of Anaerobic Technology for the Treatment of Municipal and Industrial Sewage and Wastes" en *Proc. 8th Int. Conf. Anaerobic Digestion*, 2, May 25-29, 1997, Sendai, Japan, 1997, págs. 285-292.