



**Recuperación de energía en digestión anaerobia de dos etapas de la fracción líquida de los residuos sólidos orgánicos municipales**

**Energy recovery from two-stage anaerobic digestion of the municipal organic solid waste liquid fraction**

Oscar Marín-Peña<sup>1\*</sup>, Alejandro Alvarado-Lassman<sup>1</sup>, Norma Vallejo-Cantú<sup>1</sup>, Albino Martínez-Sibaja., Erik Rosas-Mendoza<sup>1</sup>

<sup>1</sup>División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Tecnológico No. 852 Col. E. Zapata, 94320 Orizaba, Veracruz, México

\*Autor de correspondencia: [oscar.marin.ind@gmail.com](mailto:oscar.marin.ind@gmail.com)

Recibido 18 de mayo de 2020; aceptado 22 de junio de 2020

**RESUMEN**

En este estudio se analizó el desempeño y la recuperación de energía en la Digestión Anaerobia (DA) en dos etapas para el tratamiento de la fracción líquida de los Residuos Sólidos Orgánicos Municipales (RSOM). Para la etapa de hidrólisis (RH) se utilizó un reactor de biopelícula de 1200 L y para la etapa metanogénica (RM) un reactor de biopelícula de 2700 L. Para este sistema anaerobio, se alcanzaron remociones de 69 y 71 % para DQO<sub>T</sub> y DQO<sub>s</sub>, respectivamente, y 60 y 77 % para ST y SV, respectivamente. En este proceso anaerobio de dos etapas se realizó un pretratamiento de los RSOM antes de la entrada del proceso para la obtención la fracción líquida. El beneficio de recuperación de energía para el tratamiento de 1 t fue de 30.88 %. También se estimó el consumo y producción de energía para el tratamiento de 40 t de RSOM, obteniendo una recuperación de energía de hasta 76.51 % demostrando

que, tratando la fracción líquida de los RSOM, es posible obtener grandes beneficios energéticos gracias a la producción de biogás en el aprovechamiento de este tipo de residuos.

**PALABRAS CLAVE:** Digestión anaerobia, Biogás, Residuos de frutas y verduras, Recuperación de energía

### **ABSTRACT**

This study analyzed the performance and energy recovery on a two-stage anaerobic digestion for the liquid fraction of Municipal Organic Solid Waste (MOSW) treatment. A 1200 L biofilm reactor was used for the hydrolysis stage (HS) and a 2700 L biofilm reactor was used for the methanogenic stage (MS). For this anaerobic system, 69 and 71 % removals were achieved for  $DQO_T$  and  $DQO_S$ , respectively, and 60 and 77 % for ST and SV, respectively. In this two-stage anaerobic system, a pretreatment of the MOSW was carried out before entering the process in order to obtain the liquid fraction. The energy recovery benefit for the 1 t treatment was 30.88%. The consumption and production of energy for the treatment of 40 t of MOSW was also estimated, obtaining an energy recovery of up to 76.51 %, demonstrating that, by treating the liquid fraction of the MOSW, it is possible to obtain great energy benefits thanks to the production of biogas in the use of this type of waste.

**KEY WORDS:** Anaerobic digestion, Biogas, Fruit and Vegetable Wastes, Energy recovery

## INTRODUCCIÓN

El incremento poblacional y la generación de gases de efecto invernadero debido al aumento de la demanda mundial de energía ha provocado que el sector energético sea uno de los temas mas importantes hoy en día. El esfuerzo colectivo de las naciones ha sido el de disminuir las emisiones y promover la sustentabilidad del sector energético, lo que cual la producción de energías renovables ha aumentado en los últimos años ocupando una participación del 13.78%, sin embargo, el petróleo, el gas y el carbón siguen generando aproximadamente el 80% de esa energía demandada, lo que está haciendo peligrar seriamente los objetivos climáticos (IEA, 2019).

México es un país que figuraba históricamente como productor neto de energía, sin embargo, de 2012 al 2018 la producción ha caído a un ritmo acelerado de 33.12%. El 2018 es el cuarto año consecutivo en que México muestra dependencia de las importaciones de energía para satisfacer su demanda energética. Por otra parte, el consumo de electricidad per cápita, aumento 5.9% respecto al año 2017, posicionándose en 2,228.10 kilowattshora (KWh). Lo anterior, puede deberse a

diversos factores, entre los que se encuentra un incremento en la densidad poblacional de 1.0%, y un consumo generalizado de electricidad. En relación con los bioenergéticos; la producción de biogás mostró un incremento del 12.9%, lo que se tradujo en 2.84 PJ (Sener, 2018)

Los bioenergéticos son combustibles obtenidos de la biomasa provenientes de materia orgánica. Manejados de manera sustentable, estos presentan numerosas ventajas socioeconómicas y ambientales ya que son de energías limpias de fácil obtención, brinda aplicaciones para los principales usos de la energía tales como calor, electricidad y combustible para carros. De la misma manera, la aplicación de los bioenergéticos promueve el desarrollo sustentable rural y urbano al transformar los residuos generados en recursos económicos. El uso de bioenergéticos tales como el biogás, contribuye no solo al aprovechamiento de los residuos, sino también a la generación de energía. El biogás, que generalmente se refiere al gas generado por medio de la Digestión Anaerobia (AD), es un bioenergético prometedor para abordar las necesidades mundiales de energía y proporcionar múltiples beneficios ambientales (Chunlan

Mao, 2015). Se obtiene en mayor medida a partir de residuos orgánicos de origen animal o vegetal. Los Residuos Sólidos Orgánicos Municipales (RSOM) se generan en grandes cantidades en los supermercados y mercados locales y pueden ser aprovechados para producir biogás con alto contenido de metano y para reducir su disposición en vertederos. El fácil contenido de materia orgánica biodegradable de los RSOM con alta humedad facilita su tratamiento biológico y muestra la tendencia de estos desechos a la DA. Aunque sistemas convencionales de DA de una fase (las cuatro etapas de la digestión anaerobia en un solo reactor) son mas simples y fáciles de operar, pueden ser sensibles a sobrecargarse debido a la acumulación de Ácidos Grasos Volátiles (AGV) en el tratamiento de los RSOM. Por este motivo, algunos autores han reportado la DA en dos fases como un sistema biotecnológico viable para producir hidrógeno y metano y de esta manera solucionar los problemas de eficiencia de todo el proceso anaerobio. (Liu et al., 2006; Schievano et al., 2012). Las fuentes renovables han aumentado su participación tanto a nivel mundial como en México donde la producción de energía solar aumentó un 58 % y la energía eólica 23.2 %. Sin embargo, el biogás disminuyó su participación 12.9 %. (Sener, 2018). Es

necesario incrementar proyectos de generación de bioenergéticos a través de residuos tales como los RSOM para ayudar a reducir las emisiones generadas de éstos en los vertederos y así aprovecharlos para la producción de energía eléctrica. Este trabajo tiene como objetivo analizar la el tratamiento de RSOM a través de la digestión anaerobia en dos fases para la generación de biogás a escala piloto y realizar un estimado de generación de energía eléctrica para un sistema a escala industrial.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Obtención del Sustrato

El sustrato utilizado es la fracción líquida de los RSOM los cuales fueron obtenidos de un mercado local en la ciudad de Orizaba Ver. Semanalmente se recolectaron 1 t de RSO los cuales se encuentran clasificados en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Porcentaje de RSOM recolectados

Frutas y verduras	Proporción (%)
Naranja	35
Tomate	21
Sandía	16

Lechuga	6
Mango	5
Piña	3
Manzana	3
Remanente	11
<b>Total</b>	<b>100</b>

Del 100 % de los residuos recolectados, en promedio se aprovechó un 89 % para la obtención de la fracción líquida y el porcentaje restante se clasificó como remanente de fracción sólida. Los RSOM pasaron por un pretatamiento de trituración y centrifugación. La fracción líquida se almacenó y se ajustó el pH para la alimentación de los reactores.

#### **Técnicas de análisis.**

Los parámetros fisicoquímicos medidos fueron: pH mediante el método Potenciométrico 4500-H B de la Standard Methods;  $DQO_T$  y  $DQO_S$  mediante el micrométodo colorimétrico 5522 D Standard Methods utilizando un espectrofotómetro ODYSSEY DR2500 marca HACH para leer la transmitancia; Sólidos Totales (ST) y Sólidos Volátiles (SV) mediante el método gravimétrico de acuerdo con la norma NMX-AA-034-

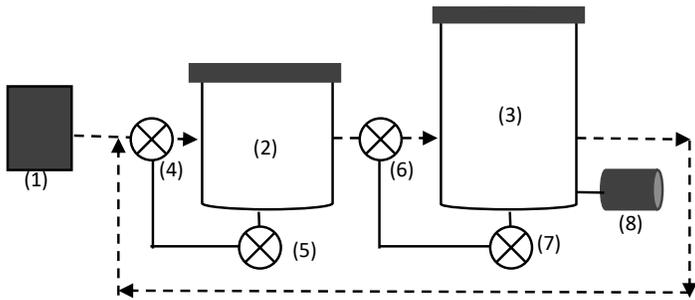
SCFI-2015. Para el monitoreo de la producción de biogás se utilizó un medidor de flujo BF-2000 y la captación del biogás se realizó por un sistema físico de desplazamiento. Para determinar la composición del biogás se utilizó un cromatógrafo de gases BuCK 310 con detector de conductividad térmica y columna empacada All Tech CTR-I, utiliza Helio a una presión de 70 psi como gas de arrastre, la temperatura de la columna es de 36 °C y la del detector es de 121 °C, la dosis de la muestra fue de 2 ml por inyección.

#### **Condiciones de operación**

La producción de biogás se llevó a cabo en un proceso de DA en dos etapas utilizando dos reactores anaerobios a escala piloto: El primer reactor utilizado fue un reactor de biopelícula de 1200 L en el cual se llevó a cabo la etapa de hidrólisis (RH) en modo batch. Para la etapa de metanogénesis se utilizó un reactor de biopelícula de 2700 L (RM), el cual fue operado en modo continuo. Para ambos reactores, se utilizaron bombas centrífugas de alimentación y recirculación de 0.5 hp. Después de obtener la fracción líquida, se alimentaron 200 L de sustrato al RH y se recirculó por 8 horas de operación diarias. El efluente hidrolizado del RH se alimentó en un

periodo de 8 horas diarias el RM, incluyendo recirculación. El esquema de la DA en dos fases de los RSOM se muestra en la Figura 1.

Parte del efluente de ambos reactores se regresa al pretratamiento cuando es requerido diluir el sustrato para obtener una alimentación constante. Para la alimentación y recirculación de ambos reactores se utilizaron bombas centrífugas de 0.5 hp.



**Figura 1.** Esquema de la DA en 2 fases: (1) Pretratamiento, (2) RH, (3) RM, (4) Bomba de alimentación RH, (5) Bomba de recirculación RH, (6) Bomba de alimentación RM, (7) Bomba de recirculación (RM), (8) Compresor RM.

## RESULTADOS

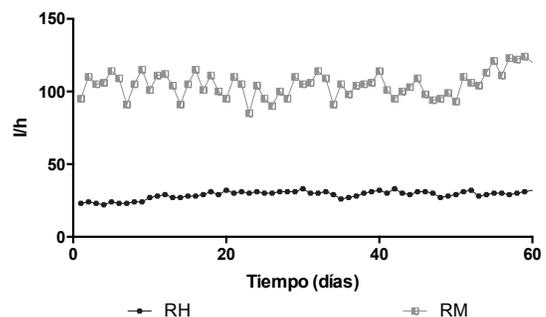
### Resultados de operación de los reactores anaerobios

En este trabajo se muestran los resultados de operación de 60 días. En la Tabla 2 se muestra la caracterización inicial de los sustratos y las remociones obtenidas.

**Tabla 2.** Resultados de operación en DA en 2 fases

Parámetro	Inicial	Salida	Remoción (%)
DQO <sub>T</sub> (g/L)	30.21	9.31	69
DQO <sub>s</sub> (g/L)	26.15	7.58	71
ST (g/L)	12.86	5.15	60
SV (g/L)	7.82	1.8	77
pH	5.5	8.2	-

El promedio de biogás generado por día fue de 250 L para el RH y 900 L para el RM. En la Figura 2 se observa el flujo de biogás para cada reactor. Se observa que el RH tuvo un promedio de 30 l/h y el RM un promedio de 115 l/h.



**Figura 2.** Flujo de biogás en reactores anaerobios

### Análisis de energía consumida y producida en el sistema anaerobio de dos fases a escala piloto.

En la Tabla 3 se presenta un análisis de la energía recuperada en la digestión anaerobia en dos fases para el tratamiento de la fracción líquida de los RSOM tratando 1 t semanales.

El pretratamiento está conformado por dos equipos: una trituradora VEYCO modelo CV-320, con una capacidad de 100 kg/h y una centrifugadora industrial de 220 L. Ambos equipos consumen 3.35 kWh para separar la fase sólida-líquida de 1 t de RSOM. Como se observa en la tabla, el consumo energético del RH es mayor debido al uso continuo de la bomba centrífuga de recirculación de 0.5 hp para la operación en modo batch del reactor. La operación del RM es menor debido a que la configuración de este reactor de biopelícula permite disminuir el consumo energético en la alimentación y recirculación del sustrato. El consumo total de la DA en dos fases para el tratamiento de 1 t de RSOM es de 15.71 kWh.

**Tabla 3.** Análisis energético en DA en dos fases tratando 1 t de RSOM

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
<b>Consumo de energía eléctrica</b>		

Pretratamiento	kWh	3.35
RH	kWh	9.08
RM	kWh	3.28
Total de Consumo	kWh	15.71
<b>Energía eléctrica producida</b>		
Alimentación RH	l/s	0.02
DQO <sub>T</sub> entrada RH	g/L	30
Remoción DQO <sub>T</sub> en RH	%	20
Rendimiento de metano en RH	LCH <sub>4</sub> /gDQOrem	0.01
Metano generado en RH	m <sup>3</sup> /d	0.10
Alimentación RM	l/s	0.02
DQO <sub>T</sub> entrada RM	g/L	25
Remoción DQO <sub>T</sub> en RM	%	70
Rendimiento de metano en RM	LCH <sub>4</sub> /gDQOrem	0.27
Metano generado en RM	m <sup>3</sup> /d	7.52
Poder Calorífico de Metano	kWh/m <sup>3</sup>	9.94
Energía eléctrica producida	kWh	22.74
Energía consumida	%	69.12

Energía recuperada	%	30.88
--------------------	---	-------

Para la energía producida se analizaron diversas variables, principalmente la materia orgánica de entrada al proceso (DQO en g/l), el flujo de alimentación de los reactores, las remociones obtenidas y el rendimiento de metano. La energía producida en este proceso de DA en dos etapas a escala piloto fue de 22.74 kWh. De la diferencia entre la energía producida y la energía consumida se obtuvo un excedente de 31 %.

Cabe mencionar que, para este estudio, de 1 t de RSOM semanales recolectados se obtuvo aproximadamente 0.8 m<sup>3</sup> de fracción líquida y 200 kg de fracción sólida remanente.

La fracción sólida se dispuso y se realizó una dilución a razón 1:1 con la fracción líquida debido a la disponibilidad variante de los RSOM en el mercado local. Otro factor que podría afectar el consumo de energía es el pretratamiento en el cual se utilizan equipos que pueden soportar una mayor carga de residuos tratados por semana.

### **Análisis de energía consumida y producida en el tratando 40 t de RSOM**

En la Tabla 4 se muestran los datos de un análisis teórico energético para la producción de energía eléctrica

tratando 40 t semanales de RSOM en la DA en dos fases a escala industrial. En este análisis se consideró que el proceso anaerobio puede abarcar mas mercados y supermercados en la ciudad de Orizaba Ver.

Siguiendo con el pretratamiento para la separación de la fase sólida-líquida de los RSOM antes de iniciar el proceso de DA en dos fases, se consideró un compactador de tornillo de 8.04 hp para residuo sólido en seco, esto quiere decir que al tratar los RSOM, los cuales tienen un alto porcentaje de humedad, el uso de este equipo se reduce considerablemente para 40 t de residuos, consumiendo únicamente 19.2 kWh. Con la disponibilidad del sustrato, la operación de los reactores pueden ser de 24 horas, en lugar de únicamente 8 horas al día. Esto eleva su consumo, sin embargo, es necesario un mayor tiempo de alimentación y recirculación de las bombas para degradar una mayor cantidad de materia orgánica.

También fueron consideradas bombas de mayor potencia para ambos reactores: para el RH se consideraron bombas centrífugas de 1.5 y 3 hp para alimentación y recirculación, respectivamente y para el RM bombas peristálticas de 1.5 y 5.3 para alimentación y recirculación, respectivamente. El consumo total para la DA en 2 fases fue de 301.62 kWh.

**Tabla 4.** Análisis energético en DA en dos fases

tratando 40 t de RSOM

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
<b>Consumo de energía eléctrica</b>		
Pretratamiento	kWh	19.2
RH	kWh	59.22
RM	kWh	282.4
Total de Consumo	kWh	301.62
<b>Energía eléctrica producida</b>		
Alimentación RH	l/s	0.370
DQO <sub>T</sub> entrada RH	g/L	90
Remoción DQO <sub>T</sub> en RH	%	20
Rendimiento de metano en RH	de LCH <sub>4</sub> /gDQOrem	0.01
Metano generado en RH	m <sup>3</sup> /d	5.18
Alimentación RM	l/s	0.370
DQO <sub>T</sub> entrada RM	g/L	72
Remoción DQO <sub>T</sub> en RM	%	76
Rendimiento de metano en RM	de LCH <sub>4</sub> /gDQOrem	0.27
Metano generado en RM	m <sup>3</sup> /d	425.50

Poder Calorífico de	kWh/m <sup>3</sup>	9.94
Metano		
Energía eléctrica producida	kWh	1284.31
Energía consumida	%	23.49
Energía recuperada	%	76.51

Para la energía producida, se consideró la fracción líquida cruda obtenida del pretratamiento, sin realizar dilución debido a la disponibilidad de los RSOM a escala industrial. Para 40 t de RSOM se obtiene 32 m<sup>3</sup> de fracción líquida, y 8 t de fracción sólida remanente. Este sustrato crudo tiene una mayor cantidad de materia orgánica a degradar por las bacterias anaerobios y, por consiguiente, la generación de biogás con alto contenido en metano puede verse beneficiada. Con una operación estable del proceso de DA en dos fases en el tratamiento de los RSOM con alto contenido de materia orgánica a la entrada, alcanzando remociones de hasta 90 % y con un rendimiento de metano de 0.27 LCH<sub>4</sub>/gDQOrem, la producción de energía sería de 1284.31 kWh, ocupando únicamente el 23.49 % para la DA en dos fases y con un excedente del 76.51 %.

Tal como se puede observar en ambos casos, el metano obtenido de la digestión anaerobia de RSOM se puede

utilizar para generar electricidad a ser utilizada en el funcionamiento de toda la planta de digestión anaerobia en dos etapas incluyendo el pretratamiento para la obtención de la fracción líquida.

### **CONCLUSIONES**

En este trabajo se analizó el beneficio energético en el tratamiento de 1 t de RSOM en la digestión anaerobia en dos fases y de la misma forma, se estimó el consumo y la producción de energía para el tratamiento de 40 t de RSOM. Para el primer caso, se tomaron en cuenta los datos experimentales en los reactores RH y RM a escala piloto, obteniendo remociones de 70 % de materia orgánica y una producción de biogás de 900 l/d en la etapa metanogénica. Con estos datos se estimó una producción de 22.74 kWh con un beneficio de recuperación de energía de hasta 30.88 %. Para el segundo caso, se analizó la producción a mayor escala en donde una disponibilidad constante de RSOM permitiría una mayor cantidad de materia orgánica a la entrada del proceso y, por consiguiente, una mayor producción de biogás. Para este caso, es posible producir hasta 1284.31 kWh con un beneficio de recuperación de energía de hasta 76.51 %. Debido a la naturaleza de este tipo de residuos, los cuales son ricos en carbohidratos, el tratamiento a mayor escala permite

una mejor eficiencia en el proceso de digestión anaerobia, así mismo en los equipos utilizados para el pretratamiento. Es de destacar, que para este estudio se considera únicamente la fracción líquida de los RSOM, para un estudio mas integral en el aprovechamiento de este residuo, la fracción sólida puede ser utilizada para compostaje o para generación de bioenergéticos, aumentando el beneficio en el tratamiento biológico de este residuo y al mismo tiempo, contribuyendo a evitar la disposición no controlada en los vertederos municipales.

### **BIBLIOGRAFÍA**

- Argosy Medical Animation. (2007-2009). Visible body: Discover human anatomy. New York, EU.: Argosy Publishing. Recuperado de <http://www.visiblebody.com>
- Bouallagui, H., Lahdheb, H., Romdan, E. B., Rachdi, B., & Hamdi, M. (2009). Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition. *Journal of environmental management*, 90(5), 1844-1849.
- IEA (2019), *World Energy Balances 2019*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-2019>
- Liu, D.; Zeng, R. J.; Angelidaki, I. Hydrogen and methane production from household solid waste in the two-

stage fermentation process. *Water Res.* 2006, 40 (11), 2230–2236.

Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540-555.

Schievano, A., Tenca, A., Scaglia, B., Merlino, G., Rizzi, A., Daffonchio, D., ... & Adani, F. (2012). Two-stage vs single-stage thermophilic anaerobic digestion: comparison of energy production and biodegradation efficiencies. *Environmental science & technology*, 46(15), 8502-8510.

Secretaría de Energía. (2018). Balance Nacional de Energía 2018. México. Recuperado de [www.gob.mx/sener](http://www.gob.mx/sener)