



## Análisis de la producción de biogás en un Relleno Sanitario en Othón P. Blanco, Quintana Roo

Manuel Carrión<sup>a\*</sup>, Fernando Murrieta<sup>a</sup>, José Luis González<sup>a</sup>, Alberto Ordaz<sup>b</sup> y Victor Hugo Delgado<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Universidad de Quintana Roo, Boulevard Bahía s/n esq. Ignacio Comonfort, Chetumal, México.

<sup>b</sup>Unidad de Estudios Superiores de Tultitlan, Universidad Mexiquense del Bicentenario, Tultitlan, Estado de México

\*[jmcarrion@uqroo.edu.mx](mailto:jmcarrion@uqroo.edu.mx)

Recibido: 12 Abril 2021, Aceptado: 31 Mayo 2021.

### Resumen

La generación de biogás en un relleno sanitario propuesto para el municipio de Othón P. Blanco fue estimada mediante el Modelo Mexicano de Biogás 2.0. El modelo fue aplicado para un periodo de operación del relleno de 10 años y considerando dos velocidades de degradación (muy rápida y muy lenta). Los resultados del modelo fueron promediados y se estimó que el relleno podría generar en promedio 3,863,923 m<sup>3</sup> de biogás al año. Esta producción de biogás permitiría de acuerdo con una simulación termodinámica con un ciclo Rankine, generar una potencia neta de 760 kW durante el periodo de funcionamiento del relleno. Este biogás generado se puede aprovechar con el uso de microturbinas, confiriendo así ventajas tanto económicas como ambientales al relleno sanitario con producción promedio de 6,485,078 kWh anuales y disminución de emisión de gases de efecto invernadero.

**Palabras clave:** residuos sólidos urbanos, relleno sanitario, biogás, producción de electricidad.

### 1. Introducción

El municipio de Othón P. Blanco se encuentra ubicado en la zona sur del estado de Quintana Roo. El municipio cuenta con una extensión de 18,760 km<sup>2</sup>, lo que representa el 36.9% del total de la entidad, y por lo tanto lo convierte en el municipio más extenso del estado con una población, de acuerdo con datos del Consejo Nacional de Población (COESPO) de 271,808 habitantes (datos del 2020) [1]. Actualmente este municipio cuenta con un tiradero de basura a cielo abierto de 180 hectáreas. Sin embargo, este tiradero no cumple con las normas de SEMARNAT para el tratamiento adecuado de los residuos sólidos urbanos (RSU), ya que presenta graves problemas de funcionamiento como la falta de barda perimetral y laguna de lixiviados, entre otros problemas graves [2]. En el caso de los lixiviados, estos representan un grave riesgo a la salud al contener compuestos altamente carcinógenos que pueden filtrarse a los mantos freáticos. Aunado a esta problemática se encuentra el hecho de que al ser un tiradero a cielo abierto se generan problemas como la liberación de gases altamente contaminantes como el metano, un gas de efecto invernadero que se encuentra presente en el biogás generado por la descomposición de los residuos orgánicos y la de volverse un hábitat para fauna nociva como moscas, ratas y perros. La inadecuada disposición de residuos sólidos es también fuente de deterioro de los ecosistemas urbanos colindantes como tierras agrícolas, sitios arqueológicos y turísticos entre otros. Una solución a estos problemas es construir un relleno sanitario en el municipio de Othón P. Blanco incorporando un sistema de recuperación del biogás producido por la

descomposición de la materia orgánica putrescible, la cual representa entre el 50 y 80% de los RSU [3]. El biogás generado en el relleno sanitario puede utilizarse como fuente de energía térmica para la generación de electricidad o para la producción de un combustible de alto poder calorífico (biometano), confiriendo así una ventaja al relleno sanitario. En años recientes el uso de microturbinas ha surgido como una tecnología innovadora para la generación de electricidad y se comercializan desde 12, 30, 70, 250, y 500 kW [4-6]. Estas funcionan de forma similar a una turbina convencional y pueden operar con una gran variedad de combustibles tales como gas natural, biocombustibles y combustibles provenientes de procesos de condensado. Estas microturbinas se pueden aplicar en rellenos sanitarios pequeños cuando se tiene recuperación de biogás menor a 11,520 m<sup>3</sup> día<sup>-1</sup> [5], presentado las ventajas de la cogeneración de energía a partir de un solo combustible y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. En este trabajo se estima la producción de biogás en un relleno sanitario propuesto por la degradación de los RSU del municipio de Othón P. Blanco, aplicando el Modelo Mexicano de Biogás para la región del Sureste y su aplicación para la generación de electricidad por medio de microturbinas.

### 2. Aspectos de simulación

#### *Estimación del flujo de biogás generado en el relleno*

Se utilizó el Modelo Mexicano de Biogás (MMB) versión 2.0 para estimar la cantidad de biogás capturado en el relleno sanitario. En este modelo se supone que el



periodo es de un año desde la colocación de los residuos y el comienzo de generación de biogás. La ecuación de degradación de primer orden que considera que la generación de biogás llega a su máximo después de un periodo de tiempo antes de la generación de CH<sub>4</sub> es [7]:

$$Q_{LFG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^1 2 k Lo \left[ \frac{Mi}{10} \right] (e^{-kt_{ij}}) (MCF) (F) \quad (1)$$

Donde  $Q_{LFG}$  es el flujo máximo de biogás esperado (m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>),  $i$  es el incremento en tiempo de 1 año,  $j$  es el incremento en tiempo de 0.1 año,  $k$  es el índice de generación de metano (año<sup>-1</sup>),  $Lo$  es la generación potencial de metano (m<sup>3</sup> Mg<sup>-1</sup>),  $Mi$  es la masa de residuos dispuestos en el año  $i$  (Mg),  $n$  es el año del cálculo menos el año inicial de disposición de residuos,  $t_{ij}$  es la edad de la sección  $j$  de la masa de residuos  $Mi$  dispuestas en el año  $i$  (años decimales)  $MCF$  es el factor de corrección de metano y  $F$  es el factor de ajuste por incendios. El valor de  $k$  depende de factores como la humedad, la disponibilidad de nutrientes, el pH y la temperatura del relleno sanitario. El Modelo Mexicano de Biogás presenta estimaciones para los valores de  $k$  y  $Lo$  en función de la ubicación en el país del relleno sanitario y de la velocidad de degradación de residuos. En este trabajo se modeló la producción de biogás en el relleno sanitario para degradación de residuos muy rápida y muy lenta y considerando la ubicación de Othón P. Blanco en el sureste de México. La Tabla 1 presenta los valores utilizados de los parámetros en el MMB.

Tabla 1.- Parámetros usados en el Modelo mexicano de Biogás

Parámetro	Degradación muy rápida	Degradación muy lenta
$k$ (año <sup>-1</sup> )	0.3	0.025
$Lo$ (m <sup>3</sup> Mg <sup>-1</sup> )	69	202
$MCF$	1	0.8

El valor de  $F$  se supone de 0.5, debido a que el biogás se compone principalmente en un 50% de CH<sub>4</sub> y un 50% de CO<sub>2</sub>. En la estimación del biogás generado se consideró un relleno sanitario tipo zanja de 12 m de profundidad, el cual iniciaría operaciones el año 2023 calculando el incremento por disposición de RSU hasta el año 2032.

El incremento de  $Mi$  por la disposición de RSU se calculó utilizando predicciones del incremento de la población estimados por la COESPO [1] y datos de RSU generados en el municipio de Othón P. Blanco del INEGI [8]:

$$Mi = (D) Pi \quad (2)$$

Donde  $D$  es la producción per cápita de RSU y se

obtuvo como el cociente de los RSU generados en el municipio (325,000 kg año<sup>-1</sup>, datos INEGI 2014) entre el número total de habitantes (COESPO 2014) y es igual a 1.28 kg hab<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>).  $Pi$  es la población del municipio predicha en el año  $i$ .

#### Estimación de la generación de energía

Para estimar la energía obtenida por el biogás producido en el relleno sanitario, se realizó una simulación termodinámica considerando un ciclo Rankine. Los parámetros utilizados en la simulación son mostrados en la Tabla 2, los cuales son valores típicos en una instalación de mediana capacidad.

Tabla 2.- Parámetros de simulación del ciclo Rankine

Parámetro	unidades	valor
Temperatura entrada turbina	°C	500
Presión entrada turbina	kPa	8,000
Presión de saturación de salida de la turbina	kPa	20
Eficiencia isoentrópica de la turbina	%	85
Eficiencia isoentrópica de la bomba	%	85

El trabajo específico de la bomba se calculó como:

$$w_{bomba} = v(P_H - P_L) \quad (3)$$

Donde  $w_{bomba}$  es el trabajo específico de la bomba (kJ kg<sup>-1</sup>),  $v$  es el volumen específico de agua (m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>),  $P_H$  y  $P_L$  son las presiones a la salida y entrada de la bomba respectivamente (kPa).

La potencia generada por la turbina se calculó mediante.

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{turbina} - \dot{W}_{bomba} \quad (4)$$

Donde  $\dot{W}_{turbina}$  se calculó con la ecuación:

$$\dot{W}_{turbina} = \dot{m}(h_{ent} - h_{sal}) \quad (5)$$

Donde  $\dot{m}$  es el flujo másico de vapor de agua (kg s<sup>-1</sup>) y  $h_{ent}$ ,  $h_{sal}$  son las entalpías de entrada y salida de la turbina respectivamente (kJ kg<sup>-1</sup>). Los valores de las entalpías, las entropías y el volumen específico fueron obtenidos de tablas termodinámicas [9]. Para la simulación termodinámica del ciclo Rankine se utilizó un poder calorífico del biogás de 18,854 kJ m<sup>-3</sup> para una densidad normal de 1.2 kg/m<sup>3</sup>.

### 3. Resultados y discusión

La Figura 1 presenta los valores estimados de los flujos de biogás para velocidades de degradación muy rápida y muy lenta en un periodo de operación de 10 años del relleno. Debido a la incertidumbre que

caracteriza la generación y captura de biogás y a la falta de datos de degradación de los residuos en el sitio, se calcularon los valores promedio de flujos de biogás mostrados en la Figura 1.

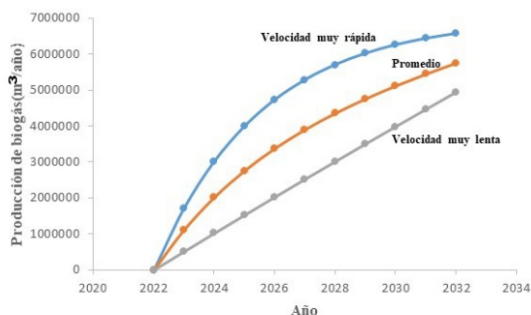


Figura 1.- Estimaciones del flujo de biogás en el periodo de funcionamiento del relleno

De acuerdo con la Figura 1 en el año 2032 se alcanzaría el flujo máximo de biogás generado en el relleno con  $6,571,078 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  para una degradación muy rápida, mientras que para una degradación muy lenta se dispondría de un flujo máximo de  $4,943,187 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ . Por la incertidumbre anteriormente mencionada, se calcularon los valores promedios para el flujo de biogás en el periodo de funcionamiento analizado para el relleno y se obtuvo un flujo promedio de  $3,863,923 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  de biogás, esto representa una producción anual importante de un combustible del cual se puede obtener beneficios económicos. Estos valores de flujo de biogás estimados por el MMB se utilizaron para calcular las potencias que se podrían generar utilizando una turbina mediante simulaciones termodinámicas de ciclos Rankine. La Tabla 3 presenta los valores de las potencias generadas; de acuerdo con estos datos, se podría generar hasta 1.2745 MW en el caso de una degradación rápida de residuos (año 2032) y una potencia promedio de 0.75 MW para el periodo de funcionamiento del relleno. La generación de electricidad que se podría obtener del relleno es mostrada en la Tabla 3. El potencial económico de esta generación depende del costo real del kWh en el año de producción. La mayoría de los rellenos sanitarios en operación utilizan motores de combustión interna (reciprocantes), turbinas y microturbinas para la generación de electricidad a partir del biogás recuperado [10]. Sin embargo; las microturbinas presentan las ventajas de una baja emisión de gas invernadero y factibilidad para combinar unidades de diferente potencia. (Blanco, y otros 2017); adicionalmente con el objetivo de aumentar el rendimiento eléctrico de las microturbinas hasta un 50% más, muchos fabricantes añaden intercambiadores de calor aire-aire (regenerador o recuperador) de alta eficiencia y bajo coste que recuperan el calor residual de los gases de escape a la salida de la turbina para

precalentar el aire comprimido antes de entrar en la cámara de combustión y de esta forma reducir la cantidad de combustible, por lo cual resultarían adecuadas para el relleno sanitario propuesto.

Es importante mencionar que las estimaciones realizadas en este trabajo dependen de varios factores entre los que hay que considerar aspectos técnicos, económicos, así como sistemas de gestión que permitan disponer de información actualizada de la cantidad de RSU dispuestos, la composición, los procedimientos de compactación y cobertura diaria de residuos, así como del sistema de recolección de biogás.

Tabla 3.- Potencias generadas con degradación muy rápida (DMR), promedio y degradación muy lenta (DML).

Año	Potencia generada (MW)			kWh producidos		
	DMR	Promedio	DML	DMR	Promedio	DML
2022	0	0	0	0	0	0
2023	0.3345	0.2174	0.0996	2889977	1875310	860643
2024	0.5868	0.3927	0.1985	5070195	3392814	1715433
2025	0.77666	0.5365	0.2964	6709633	4635646	2561658
2026	0.9194	0.6566	0.3937	7944872	5672971	3401070
2027	1.0276	0.7586	0.4900	8875518	6554594	4233670
2028	1.1084	0.8470	0.5854	9576678	7318098	505919
2029	1.1695	0.9250	0.6804	10104939	7991805	5878671
2030	1.2156	0.9950	0.7744	10502902	8597039	6691176
2031	1.2503	1.059	0.8677	10892759	9149928	7497096
2032	1.2765	1.1184	0.9602	11028676	9662578	8296479

#### 4. Conclusiones

Actualmente el municipio de Othón P. Blanco cuenta con un tiradero a cielo abierto deficiente y contaminante. Los resultados presentados en este trabajo demuestran que la implementación de un relleno sanitario en el municipio podría generar hasta  $3,863,923 \text{ m}^3$  de biogás al año. Considerando que este biogás tiene un poder calorífico de  $18,854 \text{ kJ m}^{-3}$ , para una densidad normal de  $1.2 \text{ kg/m}^3$ , se puede utilizar en microturbinas para generar electricidad, logrando una potencial recuperación económica del relleno con la ventaja ambiental de reducir gases de efecto invernadero. Para el caso de una degradación rápida se recomienda implementar una turbina Howden, modelo Core, con los parámetros de vapor de 131 bar y  $530^\circ\text{C}$ , para potencias de salida de 1 a 6 MW [11]

#### 5. Referencias

Artículos:

- COESPO. <https://qroo.gob.mx/index2.php/segob/coespo/proyecciones-de-poblacion> (accesado el 21 de mayo de 2021).
- Relleno sanitario de Chetumal es una amenaza: juez ordena cerrarlo. <https://peninsulatlres.com/momentos/relleno-sanitario-de-chetumal-es-amenaza-ecologica-juez-ordena-cerrarlo-29273> (accesado el 12 de junio de 2021).



3. Dada, O.; Mbohwa C. *Procedia Manufacturing*. **2017**, 7, 333-338.
4. Bazooyar, B.; Darabkhani H. G. *Fuel*. **2021**, 294, 1-10.
5. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Generaci%C3%B3n-de-electricidad-a-partir-de-biog%C3%A1s-capturado-de-residuos-s%C3%B3lidos-urbanos-Un-an%C3%A1lisis-te%C3%B3rico-pr%C3%A1ctico.pdf> (accesado el 25 de junio del 2021)
6. Caresana, F.; Comodi, G.; Pelagalli, L.; Pierpaoli, P., Vgani, S. *Biomass an Energy*. 2011, 35, 4331-4339.
7. Aguilar, Q.; Taboada, P.; Ojeda, S., *Ingeniería: Revista académica UADY*. **2011**, 15, 37-45.
8. Inegi. <https://www.inegi.org.mx/temas/residuos/#Tabulados> (accesado el 14 de marzo de 2021).
9. Cengel, Y.; Boles, N. *Termodinámica*, 8va. Ed.; Mac Graw-Hill: New York, 2015; pp 923-927.
10. BioCycle. <https://www.powermag.com/microturbines-useful-in-commercial-and-industrial-applications/> (accesado el 28 de junio del 2021).
11. Howden. [www.howden.com](http://www.howden.com). [https://www.howden.com/getattachment/products-and-services/Steam-turbines/Steam-Turbines\\_Overview\\_ES.pdf?lang=en-US](https://www.howden.com/getattachment/products-and-services/Steam-turbines/Steam-Turbines_Overview_ES.pdf?lang=en-US). (accesado el 10 de octubre de 2021).