**NOMBRE DEL SUB-EVENTO**

**XVIII SIMPOSIO DE INGENIERIA ELECTRICA SIE 2019**

**Título**

**Potencial energético del biogás obtenido a partir de residuos sólidos urbanos**

***Title***

***Energy potential of biogas obtained from urban solid waste***

**M. Sc. Luis Alberto Hernández Lugones1, Dr. Carlos de León Benítez2, Ing. Félix Leandro Obregón Vega3**

1- M. Sc. Luis Alberto Hernández Lugones. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba. E-mail: [lugones@uclv.edu.cu](mailto:lugones@uclv.edu.cu)

2- Dr. Carlos de León Benítez. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba. E-mail: [charle@uclv.edu.cu](mailto:charle@uclv.edu.cu)

3- Ing. Félix Leandro Obregón Vega. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba. E-mail: [obregon@uclv.cu](mailto:obregon@uclv.cu)

**Resumen:**

* **Problemática:** En la actualidad la situación energética mundial exige un esfuerzo en aras de propiciar el uso de fuentes renovables de energía. La biomasa tiene un amplio campo de aplicación en este sentido y dentro de ella los residuos sólidos urbanos. Estos representan un alto potencial de utilización, más aún si se tienen en cuenta los efectos colaterales que trae consigo un adecuado procesamiento de los mismos.
* **Objetivo: D**esarrollar un estudio de las potencialidades de generación de gas metano a partir de los residuos sólidos urbanos (RSU) a fin de ser utilizados para la generación de energía eléctrica, como una vía de empleo de fuentes renovables de energía y reducción de gases de efecto invernadero.
* **Metodología:** Se realiza un estudio descriptivo sobre los residuos sólidos urbanos, su clasificación, aprovechamiento energético en la generación de electricidad mediante la creación de rellenos sanitarios para la producción de biogás.
* **Resultados y discusión:** Existen numerosos modelos para calcular la generación del gas de residuos sólidos (GRS), es recomendable usar un modelo simple que utilice pocos parámetros, se opta por el Modelo de Degradación de Primer Orden.
* **Conclusiones:** Existe la necesidad de crear un programa nacional para que la población clasifique la basura antes de ser recogida. Se puede contribuir a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero al medio ambiente así como a la generación de energía eléctrica.

***Abstract:***

* ***Problematic:*** *At present, the world energy situation demands an effort in favor of promoting the use of renewable energy sources. Biomass has a wide field of application in this sense and within it the urban solid waste. These represent a high potential for use, even more so if the collateral effects that come with an adequate processing of them are taken into account.*
* ***Objective:*** *To develop a study of the potential of generation of methane gas from urban solid waste (RSU) in order to be used for the generation of electric power, as a way of using renewable sources of energy and reducing gases of greenhouse effect*
* ***Methodology:*** *A descriptive study is carried out on urban solid waste, its classification, energy use in the generation of electricity through the creation of landfills for the production of biogas.*
* ***Results and discussion:*** *There are numerous models to calculate the generation of solid waste gas (GRS), it is advisable to use a simple model that uses few parameters, and we opted for the First Order Degradation Model.*
* ***Conclusions:*** *There is a need to create a national program for the population to sort garbage before it is collected. It can contribute to the reduction of greenhouse gas emissions to the environment as well as the generation of electricity.*

**Palabras Clave:** Residuos sólidos; Energía; Generación; Metano; Renovable.

***Keywords:*** *Solid waste; Energy; Generation; Methane; Renewable.*

**Introducción**

Actualmente, las energías renovables se han establecido en todo el mundo como una importante fuente de energía. Su rápido crecimiento, particularmente en el sector eléctrico, es impulsado por diversos factores, incluyendo el aumento de la rentabilidad de las tecnologías renovables; iniciativas de política aplicada; un mejor acceso al financiamiento; seguridad energética y cuestiones de medio ambiente; demanda creciente de energía en economías en desarrollo y emergentes; y la necesidad de acceso a una energía modernizada. En consecuencia, en los países en desarrollo están surgiendo mercados nuevos, tanto para la energía renovable centralizada como para la distribuida[[1](#_ENREF_1)].

Los rellenos sanitarios, también llamados vertederos, producen malos olores si no son bien manejados, y pueden ser fuente de importantes contaminantes y emisiones de gases de efecto invernadero. Las emisiones de los vertederos pueden tener efectos significativos sobre la salud de las personas. Con un diseño adecuado e inversiones necesarias, los residuos sólidos urbanos depositados en estos sitios pueden dejar de convertirse en un riesgo a la salud pública, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y convertirse en fuentes de energía.

En Cuba la política del estado se orienta hacia el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía y la biomasa es una de ellas, impulsadas principalmente por motivos económicos y medioambientales[2].

En las condiciones en que se plantea la realidad urbana de las ciudades, la generación de energía eléctrica desde el biogás es posible y necesaria; lo que nos hace preguntarnos, ¿qué potencial de generación de biogás se podrá obtener a partir de la degradación de los RSU?

En aras de responder esta interrogante se hace el presente estudio de las potencialidades de generación de gas metano a partir de los Residuos Sólidos Urbanos a fin de ser utilizado para la generación de energía eléctrica como parte de la inserción de los Mecanismos de Desarrollo Limpio y cumplimentando la política actual del estado cubano con relación a la introducción y uso de las fuentes renovables de energía.

De acuerdo a estudios internacionales, un metro cúbico de biogás se genera a partir de 5 a 10 kg de residuos sólidos con un 50% de materia orgánica, resultando una mezcla de gases compuesta por un 40 a 60% de metano, 30% a 40% de dióxido de carbono, 2% a 5% de nitrógeno, 1% de oxígeno, pequeños volúmenes de amoníaco, monóxido de carbono, hidrógeno y otros. [3].

Bajo condiciones anaeróbicas, la descomposición de basuras orgánicas genera biogás, por lo que la recuperación y disposición final (neutralización o uso) del metano contenido en el biogás de este tipo de instalaciones, reduce emisiones de GEI que de otra manera se elevarían a la atmósfera. Por otro lado, debido al alto poder calórico del metano, el biogás puede ser utilizado como combustible para la generación de energía eléctrica y reemplazar el uso de fuentes más contaminantes y de mayor impacto global, desplazando así fuentes generadoras de GEI. Finalmente, los proyectos de aprovechamiento energético del biogás generados en los vertederos incentivan la mejora de los sistemas de manejo de residuos, al requerir un perfeccionamiento de las instalaciones y operaciones de disposición final de la basura[4].

**Los residuos sólidos urbanos: Generalidades**

El deterioro del medio ambiente tiene como efecto el surgimiento de situaciones o estados no satisfactorios con respecto a una parte o a la totalidad de sus componentes. A este fenómeno le llamamos problema ambiental, el cual puede tener alcance global, regional, nacional y/o local. Entre los problemas medioambientales con mayor alcance en la actualidad, está el relacionado con el aumento incontrolado de los residuos sólidos urbanos[6].

**¿Qué son los Residuos Sólidos Urbanos (RSU)?**

Normalmente nos referimos al término de residuo, a todo lo que es generado, producto de una actividad y no es de nuestro interés, ya sea por la acción directa del hombre o por la actividad de otros organismos vivos, formándose una masa heterogénea que, en muchos casos, es difícil de reincorporar a los ciclos naturales.

Los residuos han existido siempre, pero cuando comienzan a acumularse en el medio ambiente ya sea por la velocidad con la que se generan, como por la naturaleza química de estos; haciendo que se dificulte su descomposición e incorporación a los ciclos naturales, entonces comienzan a ser un problema ambiental.

En Cuba se evalúan propuestas de 28 empresas extranjeras que buscan invertir en el proyecto de gestión integrada de residuos sólidos urbanos (RSU) generados en el país, a fin de reducir impactos negativos al medio ambiente y a la salud humana; provenientes fundamentalmente de países europeos y de Canadá[7].

Actualmente se valoran las tecnologías mejor adecuadas a las condiciones de Cuba, específicamente relacionadas con los tipos de desechos que se manejan, así como también las más eficientes en la generación de electricidad a partir de los gases emanados de los residuos.

**Clasificación de los residuos sólidos urbanos**

Los residuos sólidos urbanos se pueden clasificar de diversas formas y criterios, en dependencia de la importancia que revisten la utilidad, la peligrosidad, fuente de producción, posibilidades de tratamiento, tipo de materiales, entre otros.

Por su **composición química**, los residuos orgánicos generalmente tienen un origen biológico, el agua constituye su principal componente y están formados por los residuos y los desechos de origen alimenticio, estiércol y/o animales pequeños muertos; también proceden de las actividades domiciliarias, comerciales u hospitalarias. Estos productos, todos putrescibles, originan, durante el proceso de fermentación, malos olores y representan una fuente importante de atracción para los vectores[6]. Aproximadamente el 70% de los RSU que se generan en las ciudades, son de naturaleza orgánica, pero estos también pueden clasificarse atendiendo a su origen, como se indica a continuación[8].

**Clasificación de los Residuos Sólidos Urbanos según su origen:**

**Domiciliarios:** Son originados por la actividad doméstica, como residuos de cocina, restos de alimentos, embalajes y otros.

**Comerciales:** Son generados por las actividades comerciales y del sector de servicios dentro del área urbana. En este grupo, por sus características especiales, no se incluyen los residuos de los hospitales.

**Hospitalarios:** Son aquellos desechos producidos en centros de salud, generalmente contienen vectores patógenos de difícil control. El manejo de estos residuos debe ser muy controlado.

**Constructivos:** Son originados por las construcciones, las remodelaciones, las excavaciones u otro tipo de actividad destinada a estos fines.

**Industriales:** Son muy variados en dependencia del tipo de industria, pueden ser metalúrgicos, químicos, entre otros.

**Agrícolas:** Por lo variado de su composición pueden ser clasificados como orgánicos o inorgánicos, puesto que mayormente son de origen animal o vegetal y son el resultado de la actividad agrícola.

Muchos de los residuos mencionados pueden ser reutilizables en otras actividades económicas o sencillamente para la obtención de sustancias orgánicas que se incorporan nuevamente a los ciclos naturales de ahí que **por su utilidad** los residuos urbanos puedan clasificarse en:

**Reciclables:** Pueden ser reutilizados como materia prima al incorporarlos a los procesos productivos.

**No reciclables:** Por su característica o por la no-disponibilidad de tecnologías de reciclaje, no se pueden reutilizar.

En cualquier medida tanto los residuos orgánicos como los inorgánicos, constituyen un problema de alta peligrosidad la que se hace mayor cuanto más sea el volumen de residuos que se generan, de ahí que los residuos peligrosos, si no se manejan adecuadamente, tienen características tales como inflamabilidad, corrosividad, reactividad, y toxicidad. Dentro de este grupo, existen algunos que son muy difíciles de degradar, por lo que se les considera como inertes o persistentes.

**Aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos**

Una de las más importantes direcciones para el reciclaje de los RSU es el aprovechamiento de éstos como combustible para producir energía.

Los sistemas de recuperación de la energía contenida en los desechos se dividen en dos grandes grupos:

1. **Sistemas de conversión bioquímica:** Digestión anaerobia y fermentación alcohólica.
2. **Sistemas de conversión térmica:** Pirólisis, combustión, gasificación y licuefacción.
3. **Sistemas de conversión bioquímica**

* **Digestión anaeróbica**

En los últimos años se ha expandido la aplicación del proceso de digestión anaerobia para el procesamiento de la fracción orgánica de los RSU, por la posibilidad de recuperar metano y por el hecho de que el material digerido es similar al compost producido aeróbicamente.

La digestión anaerobia es un proceso de fermentación natural, conocido por el hombre desde tiempos remotos. Ocurre de forma espontánea en ausencia de oxígeno en medios ricos en material orgánico, en presencia de un grupo de bacterias anaerobias, que descomponen y tratan los residuos dejando como resultado final, un gas combustible conocido como biogás formado generalmente por 30 - 40% de CO2 y 60 - 70 % de CH4 o gas metano (CH4). El porcentaje de estos gases en la mezcla es variable y depende de las condiciones físico-químicas en las que se desarrolla la digestión de la materia prima[6].

El metano se puede utilizar en la producción de energía eléctrica y de energía térmica. Otros subproductos del proceso son el efluente líquido alcalino rico en nutrientes y materia orgánica estabilizada con un alto valor como fertilizante y los lodos, que después de un proceso de estabilización en un lecho de secado o como aditivo en el proceso de compostaje, presentan una alta calidad para su utilización en el desarrollo de una agricultura sostenible[5].

* **Gas de rellenos sanitarios**

Se puede producir un gas combustible de la fermentación de los desechos sólidos urbanos en los rellenos sanitarios. Este es una mezcla de metano y dióxido de carbono. La fermentación de los desechos y la producción de gas es un proceso natural y común en los rellenos sanitarios; sin embargo, generalmente este gas no es aprovechado. Además de producir energía, su exploración y utilización reduce la contaminación y el riesgo de explosiones en estos lugares, y disminuye la cantidad de gases de efecto invernadero.

1. **Sistemas de conversión térmica**

Los procesos termoquímicos de conversión de la biomasa en energía o combustibles son aquellos en que se producen reacciones químicas irreversibles, a altas temperaturas y en condiciones variables de oxidación. Esta tecnología se utiliza en aquellos casos en que la biomasa, por su estado básicamente sólido y seco, permite para su transformación en energía, altas velocidades de reacción.

* **Pirólisis**

Es la combustión incompleta de la biomasa en ausencia de oxígeno, a unos 500 grados Celsius y se utiliza para producir carbón vegetal. Esto genera una corriente de gas compuesta por hidrógeno, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono y otros gases así como ceniza inerte, lo que depende de las características orgánicas del material pirolizado. La pirólisis también aparece como paso previo a la gasificación y la combustión.

* **Combustión**

La combustión es una reacción química en la que un elemento combustible se combina con un elemento comburente (generalmente oxígeno en forma de O2 gaseoso). El producto final debe volatilizarse, gasificarse y por fin oxidarse, desprendiendo calor y produciendo óxidos. Los tipos más frecuentes de combustible son los materiales orgánicos que contienen carbono e hidrógeno. El producto de esas reacciones puede incluir monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO2), agua (H2O) y cenizas.

* **Incineración**

La incineración es una de las tecnologías térmicas existentes para el tratamiento de residuos y no es más que la quema de materiales a alta temperatura, generalmente superior a 900° C. Los materiales incinerados deben mezclarse con una cantidad apropiada de aire durante un tiempo predeterminado. En el caso de incineración de los residuos sólidos, los compuestos orgánicos son reducidos a productos tales como dióxido de carbono gaseoso, vapor de agua, y sólidos inorgánicos (cenizas).

En las incineradoras los residuos sólidos pueden convertirse en energía eléctrica. La incineración en estos casos se utiliza para producir vapor a alta presión. Para poder recuperar la energía contenida en los materiales que hay en los RSU, es necesario que estos contengan un elevado poder calórico. De lo contrario, su combustión resulta poco eficiente y dificultosa y para facilitarla es necesario realizarla con la ayuda de combustibles fósiles.

* **Gasificación**

La gasificación es un proceso termoquímico en el que un sustrato que contiene compuestos de carbono (residuo orgánico) es transformado, mediante una serie de reacciones que ocurren a una temperatura determinada en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno y/o vapor de agua) en un gas combustible de bajo poder calórico.

La temperatura de operación es un factor importante en estos procesos. Para obtener un buen rendimiento de la mezcla gaseosa resultante (contenidos altos en hidrógeno y monóxido de carbono) es necesaria una temperatura mínima de 700 a 800° C.

**El relleno sanitario**

El relleno sanitario es una técnica de disposición final de los residuos sólidos en el suelo que no causa molestia ni peligro para la salud o la seguridad pública; tampoco perjudica el ambiente durante su operación ni después de su clausura. Esta técnica utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área lo más estrecha posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándola para reducir su volumen.

Con un diseño adecuado e inversiones necesarias, los residuos sólidos urbanos depositados en estos sitios pueden dejar de convertirse en un riesgo a la salud pública, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), y convertirse en fuentes de energía, ayudando a recuperar los costos de la inversión.

**Desarrollo de los MDL**

Dentro del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), lanzado en el marco del Protocolo de Kioto, los proyectos de acción climática al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero ganan créditos que pueden venderse. Este incentivo ha hecho posibles unos 8.000 proyectos en 107 países y ha puesto en circulación más de 1.600 millones de unidades de reducciones certificadas de emisiones, cada una de las cuales equivale a una tonelada de dióxido de carbono.

Los Certificados de Emisiones Reducidas (CERs) son uno de los tipos de bonos de carbono que existen. Para conseguirlos debe realizarse la inscripción de tales proyectos ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) y la correspondiente medición de la reducción de gases obtenida a través de los MDL, su impacto económico, social y ambiental. Luego estos datos se incluyen en el Documento de Diseño del Proyecto (PDD) y son presentados para su certificación.

**Estimación del potencial de generaciónde biogás del relleno**

Los modelos matemáticos son herramientas útiles y económicas para la estimación del potencial de generación del gas de residuos sólidos (GRS) en el sitio. Los resultados del modelo pueden también ser usados para evaluar los riesgos potenciales asociados a la migración/emisión del GRS, y para evaluar la factibilidad del proyecto de administración del GRS.

Hay numerosos modelos para calcular la producción del GRS, todos estos pueden ser usados para elaborar una curva de generación que permita predecir su comportamiento y cambios a lo largo del tiempo. La totalidad del gas existente y la tasa a la cual es generado puede variar de alguna manera según los diferentes modelos que se usen, no obstante, el parámetro de entrada que es común a todos ellos es el de la cantidad de residuo que es degradable.

Los demás parámetros de entrada pueden variar dependiendo del modelo que se use, pero por lo general, estos están determinados por un número de variables incluyendo las que inciden directamente en la generación del GRS, incertidumbres en la información disponible sobre el sitio y la forma en que la operación de la extracción del GRS afecta la generación en sí misma, en los casos en que se induce infiltración de aire. Otro factor importante es el espacio de tiempo entre el momento de la disposición del residuo y el comienzo de la descomposición anaeróbica. La heterogeneidad y naturaleza variable de todos los rellenos conlleva una dificultad que es la confiabilidad de los datos que se recolectan sobre el sitio [9].

Es recomendable usar un modelo simple que utilice pocos parámetros y que éstos últimos puedan ser razonablemente asignados de acuerdo con las condiciones específicas del sitio.

Los modelos cinéticos de primer orden son frecuentemente usados para estimar la producción de metano a lo largo de la vida útil de un relleno. Estos modelos son adaptados a rellenos específicos mediante hipótesis que se basan en las condiciones particulares del sitio.

**Modelo de primer orden para estimación de la generación de metano**

Este modelo tiene en cuenta el decrecimiento en la generación de gas durante la vida del relleno a estudiar, lo cual es crítico en el momento de realizar la evaluación económica de un proyecto[10].

El Modelo de Degradación de Primer Orden es el más utilizado para calcular las emisiones de CH4 del relleno. Puede ser usado para contabilizar el cambio en la tasa de generación de biogás de acuerdo a la vida útil del proyecto de relleno. Este modelo requiere de mayor conocimiento de las características del relleno, al menos en las siguientes cinco variables: promedio anual de recepción de basura, el número de años que el relleno lleva abierto, el número de años que el relleno lleva cerrado sin recibir basura (si corresponde), el potencial de generación de CH4 de la basura, y la tasa de generación anual de CH4 de la basura. El modelobásico de degradación de primer orden se presenta en la siguiente ecuación[11].

Donde:

*LFGgenerado:* es el biogás total generado en el año corriente (m3).

*Lo*: es el potencial total de generación de CH4 de la basura (m3/ ton).

*R*: Promedio anual de residuos dispuestos durante la vida activa (ton).

*k* = tasa anual de generación de metano (1/año).

*t* = Tiempo desde la apertura del relleno (años).

*c* = Tiempo desde la clausura del relleno (años).

Desarrollo del valor de Lo y K

El valor de la generación potencial de metano (Lo) de los residuos describe la cantidad total de gas metano potencialmente producido por una tonelada de residuos degradados y depende exclusivamente de la composición de los residuos del relleno sanitario (RESA). Su valor va de 6.2 a 270(m3/ton)[9]. Se han asignado valores de Lo para las cuatro categorías de degradación:

1. Residuos alimentarios, materia orgánica, son considerados como residuos degradación muy rápida.
2. Residuos vegetales, poda de arbustos y papel higiénico, son considerados residuos de degradación moderadamente rápida.
3. El papel, cartón y textiles son de degradación moderadamente lenta.
4. Los residuos considerados de degradación muy lenta son la madera, caucho, piel, huesos y paja.

*Tabla 2.1: Valores de la Generación potencial de Metano (Lo)[9].*

|  |  |
| --- | --- |
| Categoría de residuo | Lo |
| 1 | 69 |
| 2 | 115 |
| 3 | 214 |
| 4 | 263 |

La constante de caída, k,representa la tasa a la cual el metano es liberado decada kg de basura y depende del contenido de humedad, la disponibilidad de nutrientes, el pH y la temperatura. De ellos, el contenido de humedad dentro de un relleno es uno de los parámetros más importantes que inciden en la tasa de generación del gas, ya que sirve como medio para el transporte de nutrientes y bacterias. Los valores de k se basan en los tipos de residuos y el clima.

*Tabla 2.2: Valores de la tasa anual de generación de metano (1/año).*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Categoría de residuo | Clima húmedo | Clima semi-húmedo | Clima seco |
| 1 | 0.3 | 0.22 | 0.1 |
| 2 | 0.1 | 0.08 | 0.05 |
| 3 | 0.05 | 0.04 | 0.02 |
| 4 | 0.025 | 0.02 | 0.01 |

Los valores de Lo y k dependen en particular de las condiciones locales del clima y la composición de los residuos, por lo tanto, los propietarios/operadores del relleno pueden consultar otros con similitudes en los que se hayan instalado un sistema de recolección de gas para reducir la gama de valores posibles. Si se conocen los términos con certeza, el modelo de degradación de primer orden puede predecir con relativa exactitud la generación de CH4. Sin embargo, los valores de Lo y k varíanampliamente, y dificultan la exactitud de laestimación de un relleno en particular[12].

En los rangos de los valores de Lo y k desarrollados por expertos, Lo permanece siempre igual, pero el valor de k (tasa de generación) cambia con climas más secos, generando gas de manera más lenta. Una mayor humedad ambiental posee un efecto positivo sobre la generación de biogás y metano. Dado que la mitad del biogás está constituida por metano, el total de biogás que se genera en el relleno es simplemente la multiplicación por 2 de la generación de metano calculada por el modelo (de ahí el factor 2 en la fórmula).

**Estimación del potencial de generación de energía eléctrica**

El modelo para calcular el potencial de generación de electricidad utiliza cuatro variables de entrada: La captura potencial de biogás, El contenido de energía del biogás, La eficiencia del sistema de conversión, de acuerdo a su tasa calorífica y a su pérdida en cargas parásitas y El factor de capacidad anual de la planta de energía eléctrica.

**Energía potencial del biogás**

Para calcular la energía potencial contenida en el biogás capturado el modelo combina las dos primeras variables de acuerdo a la siguiente fórmula:

Donde:

*ε* = Contenido de energía por cada metro cúbico de biogás (Btu/m3).

*E* = Contenido de energía en todo el biogás capturado (Btu).

El valor de *ε* puede tomarse como 500 Btu/pie3, equivalente a 17.5 Btu/m3 [13].

**Energía eléctrica bruta**

Para calcular la energía eléctrica bruta que puede ser generada, el contenido de energía del biogás se combina con la tasa calorífica del sistema de conversión a electricidad. La tasa calorífica representa cuánta energía eléctrica (kWh) se puede generar por cada Btu de energía contenido en el biogás. La fórmula es la siguiente:

Donde:

*Tc* = Tasa calorífica del sistema de conversión (Btu/kWh).

*Lbruto* = Energía eléctrica bruta que puede ser generada por todo el biogás capturado (kWh).

La tasa calorífica de un motor de combustión interna es de 12.000 Btu/kWh, el cual se asumió como valor por defecto de η.

**Energía eléctrica neta**

Parte de la energía eléctrica bruta que se pierde en cargas parásitas en el sistema de conversión. Para calcular la energía neta que puede ser generada por el sistema de conversión, es necesario descontar estas pérdidas, por medio de la siguiente fórmula:

Donde:

π= % de energía eléctrica que se pierde en forma de cargas parásitas.

*Lneto* = Energía eléctrica neta que puede ser generada por todo el biogás capturado (kWh).

Basado en los estándares de la EPA para un motor de combustión interna, el valor por defecto de π es 2%[12].

**Energía eléctrica generada**

Finalmente, para obtener la energía eléctrica que el relleno puede generar potencialmente, se debe tomar en consideración el porcentaje de tiempo durante el cual la planta de conversión puede operar continuamente. La planta no necesariamente puede operar 24 horas al día, los 365 días del año, y deben considerarse eventuales paradas en la producción. Para ello, se ajusta la energía eléctrica neta, mediante la siguiente fórmula:

Donde:

φ = Porcentaje de capacidad anual de la planta de conversión. Basado en Valdés, 2003, el valor por defecto de φ es 90%.

**Estimación de los ingresos esperados por captura de biogás**

Los ingresos por captura de biogás provienen de la venta de Los Certificados de Emisiones Reducidas (CERs) en el mercado MDL. Para computar los ingresos por este concepto, se debe calcular el efecto invernadero del biogás capturado en el relleno, que de otra forma hubiese sido arrojado a la atmósfera. El efecto invernadero se mide en toneladas de dióxido de carbono equivalente. Para calcular la cantidad de toneladas de dióxido de carbono equivalente capturadas por el relleno, primero se debe hallar la masa de biogás capturada, y luego convertirlas a unidades de dióxido de carbono equivalente. Estas unidades de dióxido de carbono equivalente se pueden vender a un determinado precio en el mercado MDL.

**Masa de biogás capturada**

El modelo de captura de biogás explicado anteriormente expresa la variable *LFGcapturado* en m3, es decir, como volumen. Para calcular esta variable en términos de masa (que es lo importante para el efecto invernadero), se debe recurrir la densidad del biogás. Sin embargo, el MDL sólo emite CERs por concepto de captura de metano, por lo que se debe tomar la proporción del biogás compuesta por metano, y la densidad del metano. La fórmula de cálculo es la siguiente:

Donde:

ρ = Densidad del metano (kg/m³)

α = Porcentaje de metano en el biogás (50%).

M = Masa de metano capturado (kg).

A una temperatura de 0ºC, y a una presión atmosférica de 1.013 bar, ρ es igual a 0.7168 kg/m³[14].

**Unidades de CO2 equivalente**

Un kilogramo de metano tiene 21 veces el efecto invernadero de un kilogramo de dióxido de carbono (EPA). Por tanto, la fórmula para calcular la masa de dióxido de carbono equivalente es la siguiente:

**Estimación de los ingresos esperados por generación de energía eléctrica**

Existen dos fuentes de ingreso provenientes de la generación de electricidad. La primera consiste en conectarse a la red pública de electricidad, y vender la energía a compañías eléctricas, industrias u hogares. La segunda consiste en certificar, en el mercado MDL, que el biogás del relleno está reemplazando otras fuentes termoeléctricas más contaminantes, y vender estos CERs.

Los precios de la electricidad dependen de cada mercado. Este precio se calcula en base a los precios industriales de cada país, aproximándolos a un precio de oferta de generador a distribuidor.

**Venta de CERs por reducción de fuentes termoeléctricas alternativas**

De la misma forma en que existe una equivalencia de 1 a 23 entre los efectos invernadero del dióxido de carbono y del metano, existe una equivalencia entre los efectos invernadero del dióxido de carbono y de las fuentes termoeléctricas alternativas al biogás. Esta equivalencia se mide en toneladas de dióxido de carbono por MWh, y el valor por defecto del modelo es 0.59 Ton/MWh[13]. Esto quiere decir que por cada MWh de electricidad generado por el relleno, se está reduciendo lo equivalente a 0.59 toneladas de dióxido de carbono emitido a la atmósfera.

**Equivalencias en combustibles a partir de la generación de biogás**

1m3 de biogás (50% de metano) equivale:

* 0.71 litros de gasolina
* 0.55 litros de diesel
* 0.45 litros de gas licuado de petróleo

**Conclusiones**

Luego de analizar el modelo de Estimación del Potencial de Biogás se arriba a las siguientes conclusiones:

1. Es posible tener una idea aproximada de la capacidad de generación de biogás de los rellenos sanitarios, teniendo en cuenta los ajustes necesarios debido a las características particulares de cada relleno sanitario, gracias al desarrollo de investigaciones y los resultados de varios estudios de caso,
2. Existe la necesidad de crear un programa nacional para que la población clasifique la basura antes de ser recogida, práctica extendida por todo el mundo.
3. Se puede contribuir a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero al medio ambiente así como a la generación de energía eléctrica.
4. El biogás obtenido puede ser recuperado para generar energía, para lo cual existen diversas técnicas, que dependen de la capacidad de generación de biogás, del tipo y de la intensidad de utilización de la energía a generarse.

**Recomendaciones**

El presente trabajo permitió realizar un análisis del potencial de generación de biogás, sin embargo, se debe ampliar y profundizar el estudio sobre este tema, por lo que se proponen las siguientes recomendaciones:

1. Crear un programa nacional para que la población clasifique la basura antes de ser recogida, práctica extendida por todo el mundo.
2. La construcción de un relleno sanitario con generación eléctrica, siendo una variante económica en la obtención de electricidad y una forma de velar por el cuidado del medio ambiente.
3. Aplicación inmediata de los resultados obtenidos para la evaluación de asentamientos poblacionales superiores a los 100 000 habitantes.

**Bibliografía**

[1] (2016). *ENERGÍAS RENOVABLES 2016: REPORTE DE LA SITUACIÓN MUNDIAL*. Available:http://www.ren21.net/wp\_content/uploads/2016/.../GSR\_2016\_KeyFindings\_SPANISH.pdf

[2] "Del Desarrollo de las Fuentes Renovables y El Uso Eficiente de la Energía," ed. Cuba, 2017.

[3] (2017). *Vidaverde: Energias renovables* Available: http://vidaverde.about.com/od/Energias-renovables/a/Que-Es-El-Biogas.htm

[4] (2016) Informe de Sostenibilidad. *BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO*.

[5] "El metano amenaza la lucha contra el cambio climático.," in *El País*, ed, 2016.

[6] M. S. A. F. Colomina and M. S. M. S. Osuna, "Guía para la gestion integral de los residuos sólidos urbanos.," D. P. d. S. C. d. l. C. d. L. Habana, Ed., ed, 2007.

[7] (2016). *El Mecanismo de Desarrollo Limpio*. Available: http://cambioclimatico.inecc.gob.mx/sectprivcc/elmdl.htm

[8] K. V. Valencia, J. P. O. Cabrera, and P. C. M. Velásquez, "LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES DE TRANSFERENCIA DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES CON RECUPERACIÓN DE MATERIALES " 2012.

[9] Q. V. Aguilar, P. G. Aboada, and S. B. Ojeda, "Modelo Mexicano para la estimación de la generación biogás," *Revista Académica de la FI-UADY,* 2011.

[10] E. Comission, *Economic Evaluation of Emission Reductions of Methane in the Waste Sector in the EU Bottom-up Analisys Final Report*, 2001.

[11] M. S.L., C. M.F., G. J., V. O.M., and N. J.C.D., "Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results," *Waste Management,* vol. 29(1), pp. 153-161, 2009.

[12] "Turning a Liability into an Asset: A Landfill Gas-to-Energy Project Development Handbook," *Environmental Protection Agency (EPA),* 1996.

[13] V. J., S. Figueroa, and E. Concha, "Estudio de Políticas de Abatimiento de Gas de Efecto Invernadero y Desarrollo Económico," *Desafíos en el Sector de los Rellenos Sanitarios en el Caso de Chile,* 2003.

[14] (2015). *Densidad Gases*. Available: http://www.valvias.com/prontuario-propiedades-materiales-densidad-gases.php