






Propuesta de aprovechamiento energético a partir de biogás: Caso del Establecimiento Penitenciario y Carcelario “Las Mercedes” de Montería, Colombia

Proposal for energy exploitation from biogas: Case of the Security Prison Establishment "Las Mercedes" of Monteria, Colombia

Ana Michelle Gómez Constante
Ingeniera Sanitaria y Ambiental
Especialista en Gerencia de Proyectos
Corporación para el Desarrollo Comunitario
anamichelle_15@yahoo.es
 <https://orcid.org/0000-0003-3847-7114>
Córdoba, Colombia

José David Espitia Guevara
Ingeniero Sanitaria y Ambiental
Comercial de Aguas y Servicios S.A.S.
jose_espitia18@outlook.com
 <https://orcid.org/0000-0003-3746-5365>
Córdoba, Colombia

Juliana Inés Brun Mercado
Ingeniera Sanitaria y Ambiental
Especialista en Gerencia Empresarial
Lafacog S.A.S.
julibrun108@hotmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-2298-6096>
Córdoba, Colombia

Resumen

En el marco de la gestión integral de los residuos sólidos, esta investigación propone una alternativa que integra las diferentes fases involucradas en el manejo de los residuos sólidos dentro del Establecimiento Penitenciario de Mediana Seguridad y Carcelario Justicia y Paz “Las Mercedes” en la ciudad de Montería. Se planteó un sistema de generación de biogás con el fin de minimizar los impactos negativos relacionados con el manejo y la disposición de los residuos generados dentro de la institución pública, además de la obtención de beneficios económicos con la puesta en marcha del sistema. Para abordar el estudio, primeramente se desarrolló una etapa diagnóstica del manejo de los residuos sólidos, con la que se determinó la capacidad de generación de biogás; luego, se analizaron las tecnologías existentes para el aprovechamiento energético a partir de los tipos de residuos con potencial de aprovechamiento que son generados en el establecimiento y se identificó la técnica más apropiada y aplicable al área de estudio; por último, se optó por un sistema de generación energético basado en un biodigestor modelo hindú o campana flotante, como alternativa para el aprovechamiento energético



dentro de la institución. Esta propuesta arrojó resultados interesantes, ya que se logró obtener un aproximado de 60 m³ de biogás diariamente a partir de los residuos orgánicos generados en el rancho, lugar donde se preparan los alimentos para los internos, además de que es posible generar 2 985.86 KWh, que cubrirían un 5.5% de la demanda energética del Establecimiento.

Palabras clave: Biodigestor, Residuos sólidos, Tecnología, Residuos orgánicos, Cogeneración.

Abstract

In the framework of the integral management of solid waste, this research proposes an alternative that integrates the different phases involved in the management of solid waste within the Penitentiary Establishment for Medium Security and Prison Justice and Peace "Las Mercedes" in the city of Montería. A biogas generation system was proposed in order to minimize the negative impacts related to the management and disposal of the waste generated within the public institution, in addition to obtaining economic benefits with the implementation of the system. To approach the study, a diagnostic stage of solid waste management was first developed, where the biogas generation capacity was determined; then, the existing technologies for energy use were analysed from the types of waste with potential for use generated in the establishment, and the most appropriate and applicable technique to the study area was identified; Finally, an energy generation system based on a Hindu model biodigester or floating hood was chosen as an alternative for energy use within the institution. This proposal yielded interesting results, because it is possible to obtain approximately 60 m³ of biogas daily from the organic waste generated at the ranch, where food is prepared for the inmates, in addition to the fact that it is possible to generate 2 985.86 KWh, that would cover 5.5% of the Establishment's energy demand.

Key Words: Biodigester, Solid Waste, Technologies, organic waste, cogeneration.

Introducción

Los residuos sólidos han ocasionado impactos ambientales negativos por su inadecuada disposición; su producción es cada vez mayor y esto se debe al aumento de la población humana, a los procesos de transformación industrial (globalización) y a los hábitos de consumo de los individuos (Jaramillo y Zapata, 2008). Por tal motivo, la visión que se ha perpetuado hasta el momento de la gestión de los residuos sólidos se centra en la garantía de contar con sistemas de recolección apropiados y de su disposición final en los rellenos sanitarios y/o botaderos, si es el caso (Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental-AIDIS, 2006). Los residuos sólidos orgánicos representan más del 50% de los residuos municipales, conocida esta como la fracción orgánica y/o húmeda, mientras que alrededor de un 25% de los residuos está compuesto por materiales reciclables como papel, cartón, plásticos, metales, textiles, cueros, etc. (Sáez, Urdaneta y Joheni, 2014).

A través de los años se ha vuelto más imperativa la búsqueda de alternativas para la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), por ser los principales responsables del aumento de la temperatura terrestre, gases como el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄); el primero contribuye en 65% al forzamiento radiactivo¹ causado por el conjunto de GEI de larga duración y un 82%, causado en los últimos cinco años (Organización Meteorológica Mundial, 2016). En materia de GEI, Colombia, según el

¹ El forzamiento radiactivo o forzamiento climático es la diferencia entre la insolación (luz solar) absorbida por la Tierra y la energía irradiada de vuelta al espacio.

Inventario Nacional de Gases Invernadero Colombia (2012), contribuye con el 0.37% de las emisiones mundiales (180 008.18 Gigagramos); de este porcentaje, el sector de residuos sólidos aporta el 8% siendo el CH₄ el principal gas emitido, en un 94%. En los rellenos sanitarios se producen principalmente metano y dióxido de carbono, convirtiéndose en focos de emisión de GEI, por tanto, la correcta disposición y la gestión integral de los residuos sólidos, al igual que el desarrollo de tecnologías de aprovechamiento energético de estos se convierten en una necesidad de investigación en los últimos años.

Según el informe Cifras Claves del Clima Francia y el mundo (Dussud, Joassard, Wong, Duvernoy y Morel, 2016), se producen mundialmente un total de 49 Gt CO₂ equivalente, de las cuales, América Latina contribuye en un 10.9% de estas emisiones de GEI mundiales; de este porcentaje, un 2.9% corresponden al sector de residuos. Por otro lado, el sector energético, para la producción de electricidad y calor, aporta en un 25% del total de emisiones mundiales como emisiones indirectas. En América Latina, muchos países han adelantado estudios referentes al aprovechamiento energético en rellenos sanitarios, por ejemplo, en Belo Horizonte, Brasil, hacia 2008, por medio del Decreto n°12 362, el comité municipal inició a promover y desarrollar todas aquellas acciones que tuviesen como fin mitigar las emisiones de GEI, llegando a alcanzar reducciones de 5 557.9 tCO₂e hasta el 2017 (Alves, Colares y Uturbey, 2008). Del mismo modo, en el estado de Sao Paulo, en el relleno sanitario “La Essencis – CTR Caieiras”, fue instalado un sistema de generación de energía eléctrica y de iluminación a partir del biogás y se caracterizó por una alta eficiencia y bajo costo (Pecora, González-Velázquez y Teixeira-Coelho, 2009). En Colombia, se han adelantado estudios referentes al caso, en Bogotá se estudiaron las bondades técnicas y operativas en la implementación de tecnologías para el aprovechamiento energético del biogás en motores de combustión, lámparas para alumbrado público, quemadores domésticos e industriales y calderas (Hernández, 1996). En Barranquilla, Ventura, Cuavas y Saade (2007) hicieron un estudio de prefactibilidad para el aprovechamiento energético de residuos en un relleno sanitario, mediante la obtención de biogás, en este se llevó a cabo un estudio económico, de mercado y financiero, arrojando resultados alentadores para la implementación de tecnologías para la obtención de biogás en rellenos sanitarios en países como Colombia, debido a que estos resultarían, como en este caso, viables tanto económica como financieramente.

Este estudio se realizó en el Establecimiento Penitenciario de Mediana Seguridad y Carcelario “Las Mercedes”, el cual tiene capacidad para 877 reclusos, sin embargo, existe un hacinamiento del 150%, donde en su momento, habían alrededor de 2100 reclusos, además de los problemas sanitarios que presenta por el mal estado en que se encontraban las tuberías del alcantarillado (Serrano, 2016). Debido al número de la población, se producen una gran cantidad y variedad de residuos sólidos, para los cuales se propone una gestión integral por medio del aprovechamiento energético. Esta investigación buscó dar respuesta a uno de los objetivos principales de la Gestión Integral de Residuos, como lo es la reducción de residuos dispuestos, a través de un aprovechamiento energético que representa un atractivo económico y que, además, ofrezca otros beneficios como la preservación de los sitios de disposición final y del medio ambiente, por medio de la reducción de emisiones de GEI.

Desarrollo

Descripción del establecimiento

El Establecimiento Penitenciario y Carcelario Justicia y Paz “Las Mercedes”, se encuentra ubicado en la ciudad de Montería, en el municipio del mismo nombre, que también es la capital del departamento de Córdoba, ubicado en la porción noroccidental de Colombia (**Figura 1**). El Establecimiento se ubica en las coordenadas geográficas 8°44'57.42"N 75°52'14.25"O. Este Establecimiento fue diseñado para albergar a 800 Personas Privadas de la Libertad (PPL), sin embargo, para 2016 triplicaba su capacidad.

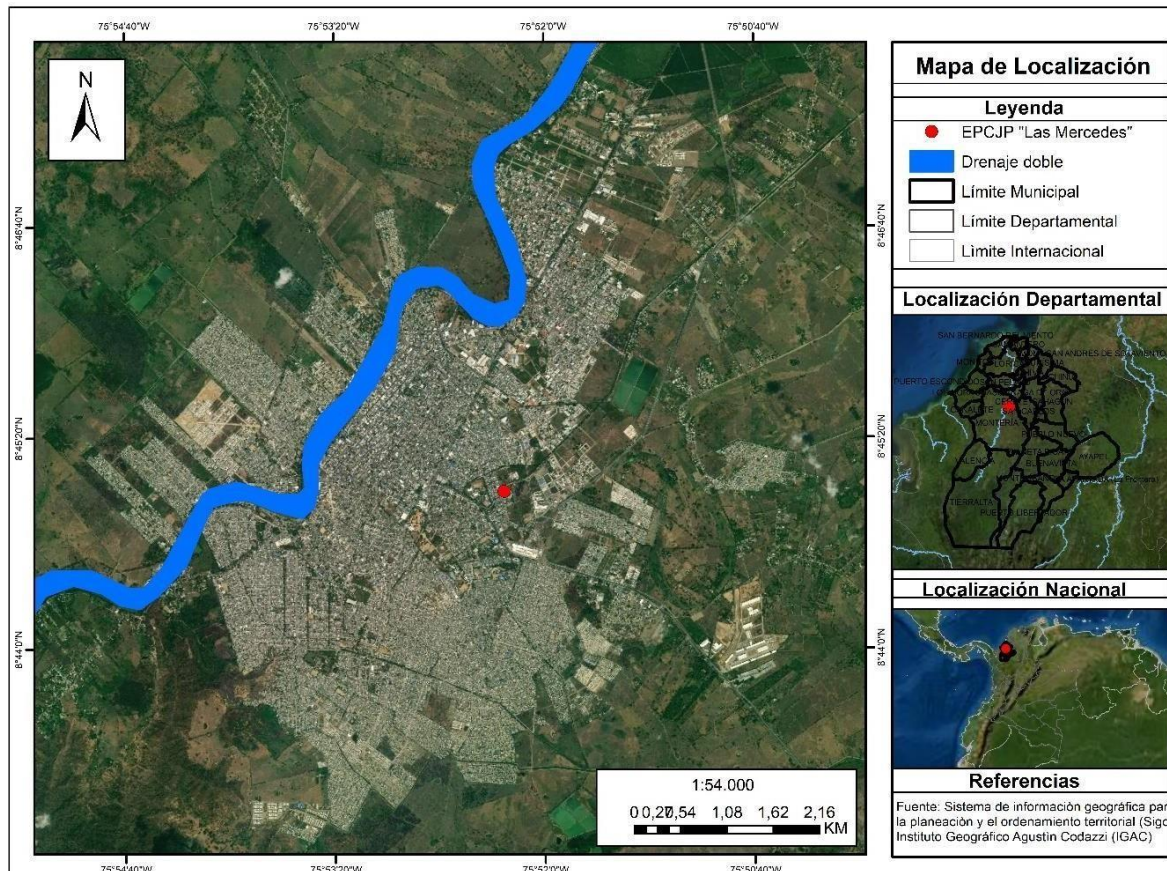


Figura 1. Localización del Establecimiento Penitenciario Las Mercedes, Montería, Córdoba.
Fuente: Elaboración propia

Para efectos de la investigación, se sectorizó el establecimiento en diferentes áreas operativas, en las cuales se desarrollan distintas actividades que generan residuos sólidos de diversa índole, ocupando los patios el mayor porcentaje del área total del establecimiento, el cual está distribuido en 10 sectores que van desde la entrada principal y registro, áreas comunes (panadería, expendio, zonas verdes y casino de la guardia), área de sanidad, área educativa, área administrativa, taller de trabajo, área de preparación de alimentos (rancho), patios, Unidad de Tratamiento Especial y Granja.

Diagnóstico general del manejo de los residuos sólidos

La gestión integral de los residuos sólidos en Las Mercedes está amparada en el marco del Plan Institucional de Gestión Ambiental (PIGA) (Instituto Nacional Penitenciario y Carcelario-INPEC, 2017), que es el músculo por medio del cual se articulan actividades micro y macro, que contribuyen a la conservación de espacios saludables libres de vectores que ocasionan enfermedades y, en algunos de los casos, ayuda a la prevención, a través de campañas de intervención sanitaria. Esta gestión interna va desde la generación en la fuente hasta la disposición final, además involucra las etapas de segregación, movimiento interno, almacenamiento central y aprovechamiento; teniendo en cuenta que los residuos comunes, peligrosos y especiales tienen un manejo diferente (INPEC, 2017).

En el diagnóstico que se realizó, fueron identificadas falencias en cuanto al cumplimiento del PIGA, ya que dentro del establecimiento no hay una adecuada separación en la fuente de los residuos generados en el área de patio, además de la existencia de tanques distribuidos sin ningún tipo de señalización ni código de colores (INPEC, 2017), causando que los residuos sólidos provenientes de esta área se conviertan en basura y no se les pueda ofrecer ninguna clase de aprovechamiento. Del mismo modo, no realizan mantenimiento al contenedor de la empresa prestadora de servicio de aseo para la disposición final de residuos dentro del establecimiento, siendo un foco de vectores considerable. El área de sanidad no cuenta con un manejo para los residuos peligrosos, si son almacenados de manera separada, considerando el código de colores, sin embargo, en conversaciones informales con los internos, manifestaron que algunas veces estos residuos llegan al contenedor. Para el manejo de estos residuos, el establecimiento cuenta con una empresa que se encarga de la disposición correcta de los mismos.

Generación de residuos

En las distintas áreas que componen el establecimiento se generan residuos en mayor o menor cantidad y su composición también varía de acuerdo al proceso realizado en estas, por ejemplo, en la panadería se generan principalmente cartón y plástico, subproducto de los empaques de materia prima y, en menor cantidad, restos de materia prima, tales como harina o masa; en el expendio, donde reciben los productos para la preparación de alimentos, se genera madera, plástico y cartón principalmente; en el taller de trabajo, debido a que se trabaja con madera, los residuos son propios de este material; los residuos provenientes de las zonas verdes son principalmente de la poda y su cantidad varía de acuerdo a la época del año; en el casino de la guardia, se generan residuos propios de cafetería, producto de preparación de alimentos pero en cantidades pequeñas; para el área educativa los residuos son papel y cartón; en los patios se producen pequeñas cantidades de residuos variados como papel, cartón, vidrio, tela, etc., incluyendo biosanitarios (por uso de baños), estos cuentan con recipientes para la clasificación y disposición temporal de los mismos; en la Unidad de Tratamiento Especial (UTE) al ser una unidad de alojamiento temporal para reclusos con comportamiento inapropiado, se producen residuos como el poliestireno expandido (conocido en Colombia como Icopor), provenientes de los empaques desechables de alimentos; y, por último, en el “Rancho”, como es llamado el lugar donde se preparan los

alimentos para todos los internos, se generan principalmente residuos orgánicos provenientes del pre-eliminación y/o acondicionamiento de las materias primas para su posterior uso, pero también se obtiene madera, cartón y plástico.

Segregación, movimiento interno, almacenamiento y disposición final

La segregación de los residuos en el establecimiento es efectuada en cada una de las áreas anteriormente mencionadas, disponen distintos recipientes dependiendo de la necesidad y tipo de residuo generado, haciendo uso de bolsas, canecas plásticas cerradas y/o abiertas; la separación se hace en lo posible según la Guía Técnica Colombiana GTC-24 (ICONTEC, 2009). En las visitas se constató que, para cada una de las áreas en el establecimiento, cuentan con recipientes para la segregación de los residuos sólidos, sin embargo, en la mayoría de las áreas no cumplen con la clasificación por colores del PIGA.

El movimiento interno consiste en el traslado de los residuos desde su lugar de generación hasta el almacenamiento central, el cual es realizado por los “Recuperadores ambientales”, que son internos que se han caracterizado por buen comportamiento y ánimo de reeducarse. La recolección de los residuos se realiza al menos dos veces al día debido al tamaño del establecimiento de 5:00 - 8:00 a.m. y luego de 2:00 - 4:00 p.m. El almacenamiento central para los residuos aprovechables como cartón, PET y madera, corresponde a un área ubicada en la parte posterior del edificio del área administrativa; en este lugar los residuos de PET y cartón son almacenados temporalmente en el suelo y expuestos a las condiciones climáticas; para el caso de los residuos orgánicos, una parte se lleva hasta un sitio donde realizan aprovechamiento de los mismos a través del compostaje, y otra parte se deposita con los residuos no aprovechables; los residuos provenientes del área de sanidad son almacenados en tanques y bolsas rojas al exterior de esta área, donde posteriormente son recolectados por la empresa autorizada para realizar la disposición adecuada de este tipo de residuos. Los demás residuos generados en el establecimiento (no aprovechables), son almacenados en un contenedor metálico rectangular, provisionado por la empresa responsable de la prestación del servicio de aseo, quienes se encargan de la disposición final en un relleno sanitario. Es importante mencionar que este contenedor está ubicado al aire libre, en las zonas verdes del establecimiento y no cuenta con protección para la lluvia ni señalización, por lo que hay presencia de vectores como zopilotes negros, presentándose malos olores que perjudican la salud y afectan la calidad ambiental.

Aprovechamiento actual

En el establecimiento se da el aprovechamiento en pequeña escala de algunos residuos, la actividad primaria de aprovechamiento es el compostaje, con el acompañamiento de la *Fundación con un granito de arena por Colombia*, usando como materia prima los residuos de alimentos como: yuca, plátano, zanahoria, cáscaras de huevo y demás provenientes del rancho, tales como cal, virutas del taller y excremento de ganado. En lo referente a residuos sólidos, el único aprovechamiento que se realiza en el establecimiento es el reciclaje de cartón, residuos PET y papel; con el papel los internos realizan bolsas decorativas, empaques, tarjetas, etc.; el cartón y los residuos PET son comercializados, contactando a un tercero.

Resultados de la caracterización

Durante siete días continuos fueron pesados los residuos provenientes de las diferentes áreas del establecimiento, según su tipo y se realizaron pruebas físicas como cenizas, humedad y densidad a los residuos orgánicos provenientes del rancho, por ser residuos orgánicos y objeto de estudio para el aprovechamiento energético. Con base en la información del diagnóstico preliminar, se distinguieron ocho tipos de residuos a cuantificar: residuos de comida, metales, cartón, papel, residuos de poda, plásticos, madera y otros, los cuales hacen referencia a los residuos mezclados o basuras provenientes principalmente de los patios donde no se hace una separación selectiva. La producción semanal promedio y la composición porcentual de los residuos generados en el establecimiento, se observa en la *Figura 2*, respectivamente.

Producción media semanal

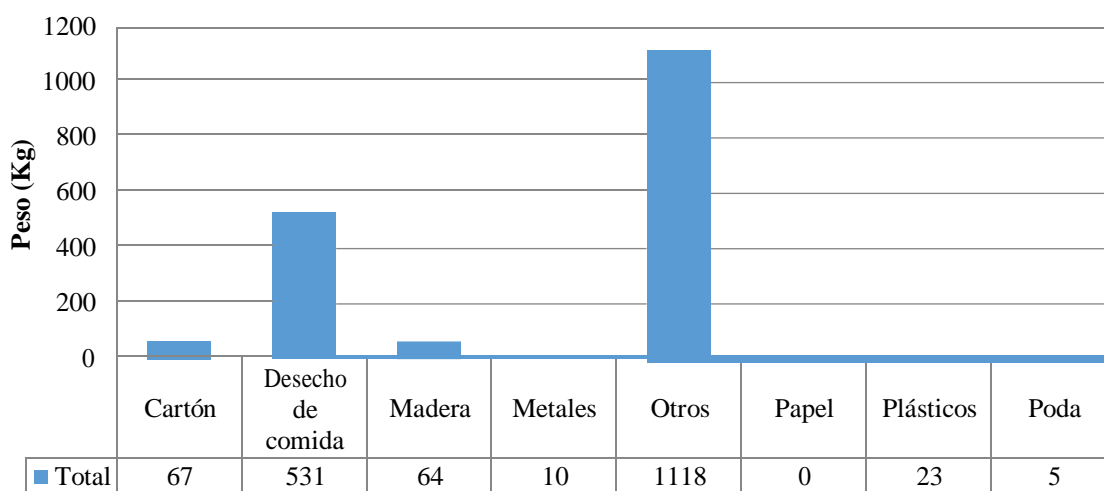


Figura 2. Producción semanal promedio del establecimiento. Fuente: Elaboración propia

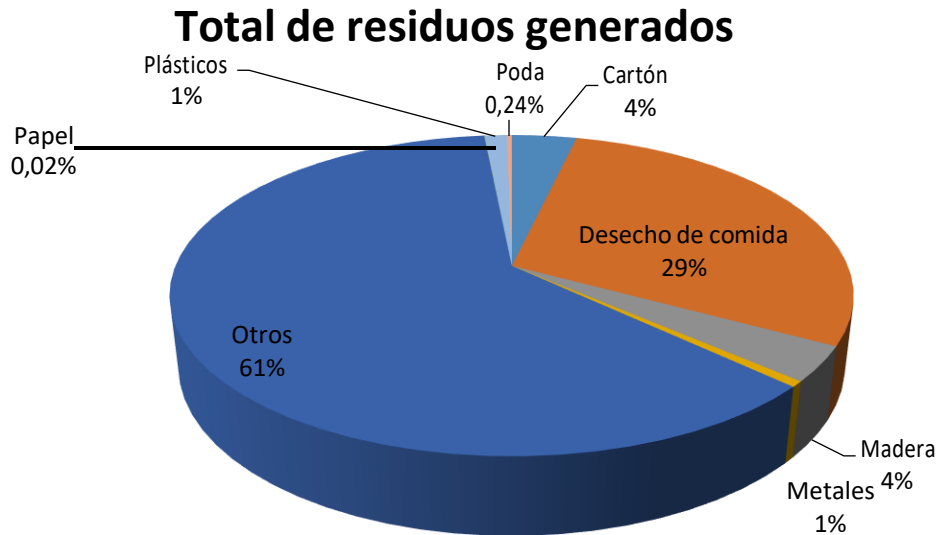


Figura 3. Composición porcentual de los residuos generados en el establecimiento. Fuente: Elaboración propia

Con base en la información recolectada en campo, se calculó la producción promedio diaria, mensual y anual, que oscilan entre los 1.82 Ton/día; 54.55 Ton/mes y 654.58 Ton/año, respectivamente. En este sentido, para estimar la densidad de los residuos orgánicos sueltos, se partió de la ecuación física:

$$D = \frac{m}{V}$$

Donde:

D = Densidad del residuo

m= Masa de los residuos orgánicos

V= Volumen que ocupan los residuos

Se calculó la densidad promedio de tres ensayos realizados a los residuos en tres días diferentes, se obtuvo que la densidad promedio de los residuos orgánicos generados en el rancho es de aproximadamente 348 kg/m³.

Por su parte, la humedad de los residuos sólidos orgánicos se expresa como un porcentaje del peso seco del material (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994), en forma de ecuación se calculó de la siguiente manera:

$$M = \left(\frac{w-d}{w} \right) * 100$$

Donde:

M = Contenido de humedad en porcentaje

w = Peso inicial de la muestra según se entrega (kg)

d = Peso de la muestra después de secarse a 105°C (kg).

A la muestra se le realizó un cuarteo (**figura 4**), partiendo de 153 kg, hasta 1.7 kg, peso final de la muestra representativa, según lo propuesto por Tchobanoglous, Theisen y Vigil (1994); el ensayo se realizó con dos repeticiones y así el promedio de humedad resultante fue de 86.1%.



Figura 4. Muestreo de residuos orgánicos con el método de cuarteo. Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo, la determinación de cenizas se realizó basado en la siguiente ecuación:

$$\%Cenizas = \frac{p_M * 100}{m_2}$$

Donde:

% Cenizas = Residuos inorgánicos que quedan después de la oxidación completa

m_0 = Masa en gramo de la cápsula vacía

m_1 = Masa en gramo de la cápsula + la muestra

P_M = Masa en gramo de $m_0 - m_1$

m_2 = Masa en gramo de las cenizas - la cápsula

Para validar la información, se tomó una muestra y dos réplicas para disminuir el margen de error (**figura 5**). Para el valor de m^2 se usó el promedio de los pesos finales de la muestra y las réplicas, arrojando un porcentaje de cenizas de 15.72%.

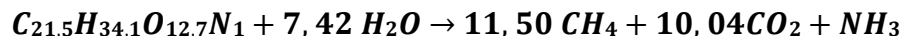


Figura 5. Muestra y réplicas en la determinación de porcentaje de cenizas. Fuente: Elaboración propia

Estimación de la Cantidad de Biogás

El 29% de los residuos sólidos generados en el rancho correspondieron a la fracción orgánica, es decir, se producen aproximadamente 531 kg de materia orgánica al día. Inicialmente, se determinó la composición porcentual de los mayores elementos que componen los residuos orgánicos generados en el establecimiento, ya que es importante tener en cuenta la influencia del contenido de humedad de los residuos, dado que esta influye en el potencial energético de los mismos (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994), por lo cual es necesario deducir la composición molar de los elementos, para así lograr determinar la fórmula química aproximada con y sin azufre y con y sin agua, teniendo en cuenta el peso atómico de cada elemento y las relaciones mol normalizadas.

De esta manera, se obtuvieron los coeficientes fraccionarios de la reacción, basados en la fórmula química sin agua y sin azufre:

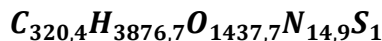


Partiendo de los pesos atómicos y pesos específicos de los compuestos que intervienen en la reacción química, se determinó el peso del metano y dióxido de carbono, obteniendo que un 53.51% del biogás producido correspondería a metano y un 46.49% a dióxido de carbono; siendo así la cantidad total teórica del gas generado por peso unitario de residuos

sólidos de 0.967 m³/kg. Basados en la producción de residuos del establecimiento se estimó la generación teórica diaria, mensual y anual de biogás, que corresponde a 513.59 m³, 15.41 m³ y 184.90 m³, respectivamente.

Estimación del contenido energético

El contenido energético de los componentes orgánicos de los residuos sólidos urbanos se determinó partiendo de la composición elemental de la fracción orgánica de los residuos (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994). Es necesario conocer la fórmula química aproximada de la materia orgánica con azufre y con agua.



Luego, con el porcentaje de contribución en peso de cada elemento, se estimó el contenido energético de los residuos usando la ecuación conocida como fórmula de Dulong modificada.

$$\frac{Kcal}{Kg} = [80,56C + 338,89(H_2 - \frac{1}{8}O_2) + 22,22S + 5,56N]$$

El contenido energético teórico calculado de los residuos es de 2 100.49 kcal/kg, lo equivalente a 8 788.43 kJ/kg. Un valor bajo en comparación con los combustibles líquidos, sin embargo, es un valor promedio de los poderes caloríficos de maderas y residuos agrícolas.

Análisis de las tecnologías

Por último, se escoge la tecnología de aprovechamiento más adecuada al área de estudio; revisando experiencias y diferentes tecnologías que existen, se hizo un análisis que tuvo en cuenta las ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías, junto con la disponibilidad de insumos y de materia prima disponible para la producción y se determinó la tecnología más apropiada. Para el establecimiento se propuso implementar un sistema de aprovechamiento de biogás basado en los procesos de biodigestión y usando como elemento principal del tratamiento un biodigestor modelo Hindú de Tambor o Campana Flotante. Este tipo de reactor es de flujo semi-continuo, es decir, se carga en lapsos cortos de 12 horas, una vez al día o cada dos días, lo que resulta conveniente, debido a la frecuencia y disponibilidad de materia orgánica en el lugar. Cabe resaltar que se llama tambor flotante, debido a que este se eleva por la presión del Biogás que se va acumulando, presión que es constantemente generada por el peso del tambor (Rodríguez, 2014). Además de esto, los biodigestores ofrecen la ventaja de producir no solo biogás, sino también se obtiene un bioabono rico en nutrientes, producto de la descomposición anaeróbica de los residuos, que puede ser usado como fertilizante natural y emplearse en futuros proyectos agrícolas en el establecimiento penitenciario.

Etapas del tratamiento

Para la generación de biogás, es necesario que los residuos orgánicos pasen por un tratamiento que tiene como centro de procesamiento un biodigestor, donde se da digestión anaerobia de la materia orgánica (Zepeda y Orestes, 2013). En este caso, teniendo en cuenta las condiciones en que se reciben los desechos orgánicos provenientes del rancho y el potencial de biogás que se espera generar; se propuso seguir las siguientes etapas para su tratamiento:

- *Pretratamiento*

La fase de pretratamiento busca aumentar la biodegradabilidad de los sustratos que serán digeridos anaeróbicamente en el tratamiento primario para la producción de biogás, es decir, aumentar la producción de biogás en el menor tiempo posible (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía-IDAE, 2011). Para el sistema, se recomendó una trituradora, que resulta ser una excelente solución tecnológica y ecológica para procesar todo tipo de residuos.

- *Tratamiento primario*

Para el tratamiento primario, se propuso el uso de un biodigestor tipo campana flotante; para su diseño es necesario calcular el tiempo de retención de los residuos, la masa de carga de la materia, el volumen de alimentación, la cantidad de agua con la que será misturada la mezcla, entre otros.

- *Tratamiento secundario*

Luego de generarse el biogás, se deberá realizar un tratamiento secundario de purificación de biogás, para eliminar azufre (S), puesto que el uso que se le va a dar requiere remoción de azufre y de dióxido de carbono en pequeñas proporciones, además de un dispositivo para remoción de vapor de agua.

Diseño del Biodigestor

El diseño del biodigestor se realizó según lo planteado por Báez y Benítez (2015). Se parte de la cantidad de materia orgánica disponible diariamente, por ello se planteó construir dos unidades de biodigestores idénticas, que trabajen con la mitad de la materia orgánica disponible para la carga y se siguen los criterios marcados en la **tabla 1** para el diseño de una unidad.

Tabla 1.
Características del biodigestor

Característica	Unidad	Valor
Materia orgánica disponible para la carga (MC)	kg	265.50
Porcentaje de sólidos totales (%ST)	%	13.10

Característica	Unidad	Valor
Sólidos totales (ST)	kg	73.81
Masa de agua para la mezcla de carga del biodigestor (MH ₂ O)	kg	82.3
Carga de ingreso al biodigestor (C)	kg	347.80
Tiempo de retención (TR)	días	20
Volumen del biodigestor (VD)	m ³	10
Cantidad de biogás diaria (PG)	m ³ /día	30
Altura de mezcla en la cámara	m	2.55
Dimensionamiento de la tubería	pulgadas	0.5
Poder calorífico teórico del gas obtenido	Superior	27.152 kJ/m ³
	Inferior	22.904 kJ/m ³

Fuente: Elaboración propia

Usos finales

Para el uso final del biogás generado en el establecimiento, se propuso el uso de microturbinas a gas, ya que se adaptan muy bien a combustibles con poderes caloríficos bajos y contenidos altos de ácido sulfúrico, así como a combustibles no convencionales como el biogás, con contenido de metano mayor al 35%. Este tipo de microturbinas se basan en el principio de las turbinas convencionales, simplificando los elementos mecánicos, quedando únicamente una pieza móvil en toda la máquina. Esta pieza móvil contiene la única etapa de compresor, la única etapa de turbina y el eje del alternador (Micropower Europe, 2017). Identificadas las condiciones iniciales, se seleccionó una microturbina marca CAPSTONE, referencia C30 Renewables fuels.

Finalmente, conociendo la eficiencia a la que trabaja la microturbina (información suministrada por el proveedor), se calculó la potencia real que generaría el sistema con un tiempo de generación de ocho (8) horas, un volumen disponible de 60 m³ de gas y flujo volumétrico de 0.002089 m³/s. Así se tiene que se generaría una potencia de 12.44 kW, para una energía diaria generada de 99.53 kWh y mensual de 2 985.86 kWh.

En la **Figura 6** se muestra un esquema con los componentes del sistema que se propuso para “Las Mercedes”, el cual está integrado por (1) picadora o trituradora, (2) caja de distribución, (3) biodigestores en paralelo, (4) reservorio del gas, tanque de sellado del almacenamiento del gas y guía de sujeción del tanque, (5) dispositivo de eliminación de agua, (6) dispositivo de eliminación de sulfuros de hidrógeno y (7) caseta de generación (microturbina).

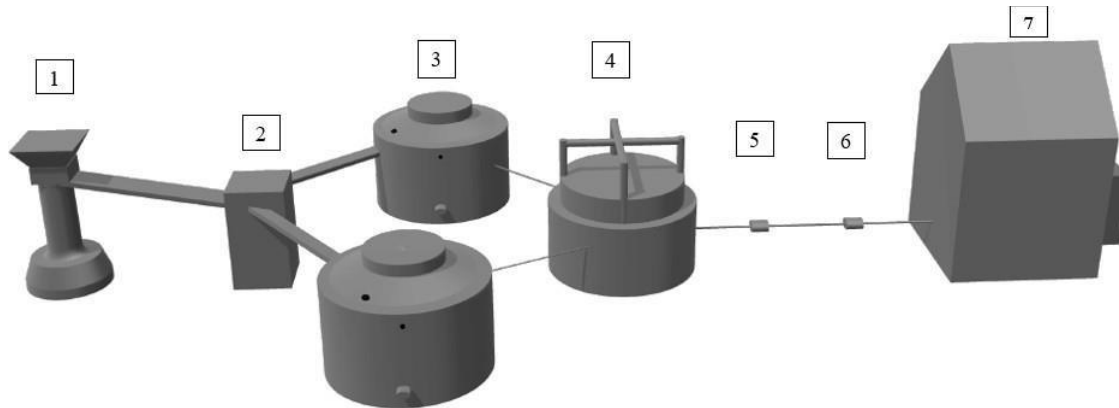


Figura 6. Esquema del sistema de generación energética para “Las Mercedes”. Fuente: Elaboración propia

Demanda energética de Las Mercedes

La demanda energética del establecimiento se determinó como el promedio mensual del consumo medido por el prestador de servicio de energía en un periodo de un año. El promedio de consumo eléctrico mensual del establecimiento fue de 54 610 kWh y la energía mensual a generar con el sistema de aprovechamiento sería de 2 985 kWh, es decir, se cubrirá un 5.5% de la demanda energética.

Conclusiones

La potencia real generada por la microturbina sería de 12.44 kW, es decir, se espera producir 99.53 kW/h diario y 2 985.86 kW/h al mes, cubriendo el 5% de la demanda energética.

La demanda energética del Establecimiento es bastante elevada al igual que los costos asociadas a esta, por lo que, con la implementación del sistema se estará ahorrando cerca de \$ 2 213 656.00 pesos colombianos mensuales, lo que representa un monto a considerar, teniendo en cuenta que los costos pueden variar en el tiempo con el aumento o disminución del consumo y/o costo de la energía eléctrica.

En relación con los gases de escape del sistema de microturbinas, la temperatura de estos puede aprovecharse en un proceso cogenerativo de energía térmica, aprovechando esta energía residual del sistema, para calentamiento de agua si en algún momento el establecimiento lo requiere.

El bioabono obtenido del proceso de biodigestión deberá ser periódicamente extraído por el orificio destinado para ello en el tanque de biodigestión y puede ser utilizado como fertilizante para la granja del establecimiento, o bien, aprovecharse en los procesos de compostaje con miras a la venta del abono resultante.

Debido a la reducción de residuos sólidos a disponer en el relleno sanitario, además de los beneficios en la generación energética, se obtendrá una reducción considerable en el pago de la tarifa del servicio público de aseo.

Se recomienda un mayor control en la separación de los residuos orgánicos en el rancho, con el fin de evitar problemas en las máquinas responsables del pretratamiento de los residuos orgánicos.

Referencias

- Alves, L., Colares, R. y Urtubey, W. (Abril de 2008). As Atratividades Ambientais e Econômicas do Uso do Biogás Produzido pelo Aterro Sanitário de Belo Horizonte para Geração de Energia Elétrica. Belo Horizonte, Brasil: Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos.
<https://www.ppgee.ufmg.br/documentos/PublicacoesDefesas/839/SBSE0224.pdf>
- Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental-AIDIS. (2006). *Directrices para la gestión integrada y sostenible de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe*. Sao Paulo, Brasil: AIDIS y IDRC.
- Báez, G. y Benítez, D. (2015). *Diseño y construcción de un biodigestor tipo campana flotante con la utilización de desechos porcinos para la finca "El Recuerdo"*. Tesis de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito. Quito, Ecuador.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/11470/3/UPS-KT01209.pdf>
- Dussud, F., Joassard, I., Wong, F., Duvernoy, J. y Morel, R. (2016). *Cifras Claves del Clima Francia y el mundo*. París, Francia: Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Énergie. http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0062/Temis-0062856/17567_2016_ESP.pdf
- Hernández, L. A. (1996). Tecnologías para el aprovechamiento del gas producido por la digestión anaeróbica de la materia orgánica. *Agronomía Colombiana*, 13(1), 76-90.
<http://www.bdigital.unal.edu.co/24322/1/21468-73326-1-PB.pdf>
- Instituto Nacional Penitenciario y Carcelario-INPEC. (2017). *Plan Institucional de Gestión Ambiental*. Montería, Colombia: Establecimiento Penitenciario de Mediana Seguridad y Carcelario Montería.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (29 de Mayo de 2009). *Gestión ambiental. Residuos sólidos. Guía para la separación en la fuente*. Norma Técnica Colombia GTC 24. Bogotá D.C., Colombia: ICONTEC.
<http://www.bogotaturismo.gov.co/sites/intranet.bogotaturismo.gov.co/files/GTC%2024%20DE%202009.pdf>

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2012). *Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero de Colombia*. Bogotá, D.C., Colombia: IHMEAC Y PNUD.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía-IDAE. (2011). *Situación y potencial de generación de biogás. Estudio técnico PER 2011-2020*. Madrid, España: IDAE. https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e16_biogas_db43a675.pdf
- Jaramillo, G. y Zapata, L. (2008). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. Tesis de Especialización en Gestión Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/45/1/AprovechamientoRSOUenColombia.pdf>
- Micropower Europe. (2017). *Micropower Europe "Energía fiable donde y cuando quieras, limpio y simple"*. Recuperado el 17 de octubre de 2017, de Tecnología Micropower Europe: <http://www.micropowereurope.com/Tecnolog-a/>
- Organización Meteorológica Mundial. (2016). *Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero 2015*. Boletín, OMM. Recuperado el 11 de Noviembre de 2016, de https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=19647#.XrQ-zagzBIU
- Pecora, V., González-Velázquez, S. M. S. y Teixeira-Coelho, S. (2009). *Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica: Estudo de caso em São Paulo*. In Anais. Curitiba, UFPR, 2009. Curitiba, Brasil: Universidade Federal do Paraná (UFPR). <https://www.tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2016/04/APROVEITAMENTO-DO-BIOG%C3%81S-PROVENIENTE-DOS-RES%C3%84DUOS-S%C3%93LIDOS-URBANOS-PARA-GERA%C3%87%C3%83O-DE-ENERGIA-EL%C3%89TRICA.pdf>
- Rodríguez, L. (2014). *Viabilidad técnica para producción de biogás a partir de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos – FORSU*. Tesis de Especialidad en Gestión de Residuos Sólidos, Universidad Escuela de Administración de Negocios-EAN. Bogotá D.C., Colombia. <https://repository.ean.edu.co/bitstream/handle/10882/1560/RodriguezLuis2014.pdf;jsessionid=D5F967EDA5876BD7BD14BE4A36A6D36A?sequence=1>
- Sáez, A., Urdaneta, G. y Joheni, A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia* 3, 121-135. <https://www.redalyc.org/pdf/737/73737091009.pdf>
- Serrano, N. (2016). *Crisis de cárcel de Montería tocó fondo*. Recuperado el 27 de mayo de 2016, de El Universal: <https://www.eluniversal.com.co/regional/cordoba/crisis-de-carcel-de-monteria-toco-fondo-227057-KQEU332888>

- Tchobanoglous, G., Theisen, H. y Vigil, S. (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. México: Mc Graw-Hill.
- Ventura, J., Cuavas, V. y Saade, T. (2007). El biogás y los diversos mercados energéticos. CASO: Relleno sanitario de Henequén, D. M. Barranquilla, Colombia. *ACODAL*, 32-36.
- Zepeda, D. y Orestes, F. (2013). *Diseño de planta de tratamiento de desechos orgánicos para la generación y aprovechamiento de biogás*. San Salvador, El Salvador: Escuela Especializada en Ingeniería ITCA - FEPADE. <https://www.itca.edu.sv/wp-content/themes/elaniin-itca/docs/2013-Diseno-de-planta-de-tratamiento-de-desechos.pdf>