

TECHNICAL FEASIBILITY OF AN ELECTRICAL GENERATION PLANT FROM MUNICIPAL SOLID WASTE IN HONDURAS, CENTRAL AMERICA

Roger Lobo, Estudiante Ingeniería Energía¹, Santiago Gutiérrez, PhD², and Héctor Villatoro, PhD¹.
Universidad Tecnológica de Honduras (UNITEC), Honduras, Rogerlobo180@unitec.edu, Hector.villatoro@unitec.edu.hn
Universidad Politécnica de Guanajuato, México, sgutierrez@upgt.edu.mx

Abstract— La Ceiba, Atlántida, is an important tourist city in Honduras with a population of 214,917 inhabitants. In the last decade, the city's economy has shown a decrease, affecting the electric and environmental sectors of the city. In the environmental sector, it has been more than 20 years since a company specialized in the treatment of municipal solid waste has been contracted, and in the electrical sector, investment in studies of electricity generation projects is difficult, causing overloads in the lines, causing interruptions in the flow. electric. Based on this problem, it was decided to carry out a technical feasibility study to serve as a reference for the implementation of an electricity generation plant from biogas generated from biomass from municipal solid waste in La Ceiba. A small-scale methodology was implemented for the characterization of solid waste that serves as a reference for future research, in order to know the amount of raw material available for the project and have an orderly accounting of municipal solid waste. It is proposed to evaluate the technical feasibility by calculating if the available raw material to be used is sufficient and by designing a biomass plant that meets the needs of the available raw material. Finally, a calculation will be made of the CO2 emissions that the project will emit, in order to have greater control of the environmental part. The purpose of this research is to demonstrate that the organic matter of municipal solid waste can be used to feed two lagoon-type biogas plants for the production of biogas that works as fuel to feed an electric generator to produce electricity in La Ceiba.

Keywords: Biomass, municipal solid waste, technical feasibility, power generation, biogas production, CO2 emissions.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.763>
ISBN: 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

FACTIBILIDAD TÉCNICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES EN HONDURAS, CENTROAMÉRICA.

Roger Lobo, Estudiante Ingeniería Energía¹, Santiago Gutiérrez, PhD², and Héctor Villatoro, PhD¹.
Universidad Tecnológica de Honduras (UNITEC), Honduras, Rogerlobo180@unitec.edu, Hector.villatoro@unitec.edu.hn
Universidad Politécnica de Guanajuato, México, sgutierrez@upgt.edu.mx

Resumen Ejecutivo — La Ceiba, Atlántida, es una ciudad turística importante de Honduras con una población de 214,917 habitantes. En la última década, la economía de la ciudad ha presentado un decrecimiento, afectando al sector eléctrico y ambiental de la ciudad. En el sector ambiental hace más de 20 años que no se contrata una empresa especializada en el tratamiento de los residuos sólidos municipales y en el sector eléctrico se dificulta la inversión en estudios de proyectos de generación eléctrica ocasionando sobrecarga en las líneas provocando interrupciones en el flujo eléctrico. Con base en esta problemática se decidió realizar un estudio de factibilidad técnica que sirva como referencia para la implementación de una planta de generación eléctrica a partir de biogás generado de biomasa proveniente de los residuos sólidos municipales de La Ceiba. Se implementó una metodología a pequeña escala para la caracterización de los residuos sólidos que sirva como referencia para futuras investigaciones, con la finalidad de conocer la cantidad de materia prima disponible para el proyecto y tener una contabilidad ordenada de los residuos sólidos municipales. Se propone evaluar la factibilidad técnica al calcular si la materia prima disponible a utilizar es suficiente y al diseñar una planta de biomasa que cumpla con las necesidades de la materia prima disponible. Por último, se hará un cálculo de las emisiones de CO₂ que el proyecto emitirá, para tener un mayor control de la parte ambiental. La finalidad de la presente investigación es demostrar que se puede utilizar la materia orgánica de los residuos sólidos municipales para alimentar dos biodigestores tipo laguna para la producción de biogás que funcione como combustible para alimentar un generador eléctrico para producir energía eléctrica en La Ceiba.

Palabras clave: Biomasa, residuos sólidos municipales, factibilidad técnica, generación eléctrica, producción de biogás, emisiones de CO₂.

I. INTRODUCCIÓN

La presente investigación se basó en la realización de un estudio de factibilidad técnica de una planta de generación eléctrica a partir de biomasa, donde se propone utilizar la materia orgánica de los residuos sólidos municipales para producir biogás que sirva como combustible para alimentar un generador eléctrico que permita generar energía eléctrica en La Ceiba. Igualmente se implementó una metodología de caracterización de la basura para tener una estimación de los

residuos sólidos del municipio según su clasificación. La factibilidad técnica se evaluó al calcular si la materia prima disponible a utilizar es suficiente y al diseñar una planta de biomasa que cumpla con las necesidades de la materia prima disponible. Por último, se hizo una estimación de las emisiones de CO₂ que el proyecto emitirá. El tipo de tecnología a utilizar para el presente proyecto será de dos biodigestores de tipo laguna de 35 toneladas, que contarán con sus fosas de mezcla y neutralización, su laguna de oxidación, y un lugar donde se triturará la materia orgánica. El diseño de la planta es adaptado de un proyecto de generación de biomasa en El Negrito, Yoro. En la actualidad, en el territorio nacional no existe ningún proyecto de generación de energía eléctrica a partir de biomasa utilizando los residuos sólidos municipales, por lo que la presente investigación servirá como referencia para futuras investigaciones y proyectos que deseen utilizar los residuos sólidos municipales como recurso energético para generar electricidad y a su vez reducir el impacto ambiental que los residuos sólidos generan. Los residuos sólidos son recursos energéticos que tenemos a nuestra disposición que al darles un correcto uso puede generar beneficios a nuestro país.

En La Ceiba, Atlántida se recolectan 150 toneladas de residuos sólidos municipales diariamente. Estos residuos sólidos municipales son recolectados por ballenas compactadoras en el 95% del territorio ceibeño. Sin embargo, en La Ceiba hace 20 años que no contratan una empresa especializada en el tratamiento de los residuos sólidos, motivo por el cual no hay un proceso de caracterización de los residuos, ni existe un proceso de tratamiento de los residuos sólidos definido. La biomasa es una de las fuentes energéticas más importantes de todo el mundo, por lo que en la presente investigación se plantea una solución para utilizar los residuos sólidos como recurso energético para generación de energía eléctrica. Con base en la problemática se propone realizar un estudio de factibilidad técnica para la implementación de una planta de energía eléctrica a partir de biomasa para producir energía eléctrica y dar un correcto tratamiento a los residuos sólidos municipales. El proyecto se

realizará mediante un biodigestor que utilizará la materia orgánica depositada en el vertedero municipal como materia prima para producir biogás mediante un proceso de fermentación anaeróbica para ser utilizado como combustible para alimentar un generador eléctrico para producir electricidad.

En la actualidad, existen diferentes proyectos y estudios que utilizan los residuos sólidos como materia prima para generar energía eléctrica. Un estudio fue realizado en la Universidad de Antioquia en Colombia donde se utilizó los residuos sólidos urbanos para la generación de energía eléctrica donde se presentó estrategias para optimizar este tipo de centrales (Montiel-Bohórquez, 2019). Otro estudio publicado en el Banco Inter -Americano del Desarrollo utiliza los residuos sólidos para producir biogás para generación de electricidad. En este estudio se realizó un estudio teórico práctico de la generación de biogás mediante los residuos urbanos (Blanco & Santalla, 2017). El departamento de agricultura de los Estados Unidos igualmente desarrolló un estudio donde utilizan los residuos sólidos municipales para generación de energía eléctrica. Así mismo se presentó los impactos ambientales y cómo utilizar los recursos de forma eficiente (Berger, 2015). Así mismo, en México se realizó un estudio donde evalúan desde la situación actual del país el potencial energético de los residuos sólidos municipales para generación de energía eléctrica (Fernández, 2010). Por último, igualmente hay un estudio con características similares al anterior para evaluar los residuos sólidos como recurso energético para la generación de electricidad (Rubiano, 2010).

El objetivo de la presente investigación fue evaluar la factibilidad técnica para la implementación de una planta de generación eléctrica a partir de biomasa en La Ceiba, Atlántida, Honduras, utilizando los residuos sólidos municipales para ayudar a producir energía eléctrica en la ciudad y reducir el impacto ambiental. Donde se realizó un trabajo de caracterización de los residuos, se determinó el potencial de biogás de la materia orgánica, se determinó la demanda de La Ceiba, se identificó el vertedero municipal, se diseñó la planta de biogás, y se calculó las emisiones de CO₂

II. METODOLOGÍA

A. Población y muestra

La población y muestra de la siguiente investigación se localiza en Honduras, país ubicado en Centroamérica con costas en océano Atlántico y océano Pacífico. La superficie del territorio hondureño es de 112,492 km², haciendo frontera con Guatemala, Nicaragua y El Salvador. Dentro de sus atractivos turísticos internacionales se encuentran las Islas de la Bahía, donde se ubica la isla de Roatán. La investigación del proyecto se ubica específicamente en el departamento de Atlántida en el municipio de La Ceiba, ubicada en la región

de litoral atlántico del país. Principalmente, en el vertedero municipal de la ciudad de La Ceiba ubicado frente a la Residencial Alameda en la parte alta. La Ceiba tiene una población de 214,917 habitantes según el censo realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas, por lo que según la Dirección General de Gestión Ambiental tiene una producción per cápita de basura aproximada de 0.75 kg por día por habitante.

B. Búsqueda de Información

Primeramente, se utilizó el apoyo y lectura de artículos científicos internacionales y boletines estadísticos nacionales para conocer un poco del macroentorno y microentorno de la biomasa y sus aplicaciones en el sector energético. Luego, se realizó entrevistas con el Departamento de Servicios Públicos de la municipalidad de La Ceiba con el fin de obtener información sobre la recolección de residuos sólidos, el estado del vertedero, los tratamientos que se realizan e instrumentos utilizados para recolectar los desechos. Así mismo se realizó entrevista con el Departamento de altos consumidores de la ENEE (Empresa Nacional de Energía Eléctrica) con la finalidad de obtener datos exactos de la demanda eléctrica de La Ceiba, cantidad de abonados y la cantidad de circuitos y subestaciones existentes. Debido a que La Ceiba no cuenta con un proceso de caracterización de la basura, la presente investigación se realizará mediante un muestreo de los residuos sólidos del sector residencial con la finalidad de idear una metodología que pueda estimar la cantidad de recurso energético disponible según sus diferentes clasificaciones. Estimando la cantidad de recurso energético se procederá a la selección del biodigestor a utilizar para la producción de biogás que se utilizará como combustible para alimentar un generador eléctrico para generar electricidad.

C. Metodología de validación

La metodología de la presente investigación consta de siete partes:

1. Caracterización de los residuos sólidos municipales de La Ceiba según su clasificación (vidrio, papel, metal, entre otros).

A) Tamaño de la muestra

Se calculó el número total de viviendas en el municipio de La Ceiba y se tomó como promedio cinco habitantes por vivienda.

$$\text{Total de viviendas} = \frac{\text{Población Total del Municipio}}{\text{Promedio de Habitantes por vivienda}}$$

Ecuación 1. Total de viviendas.

Se utilizó la siguiente ecuación para determinar el número total de viviendas a muestrear para el municipio, donde se realizó una sola repetición por vivienda:

$$n = \frac{k^2 \times p \times q \times N}{(e^2 \times (N - 1)) + k^2 \times p \times q}$$

Ecuación 2. Tamaño de la muestra.

Donde:

n= tamaño de la muestra
k= nivel de confianza. (1.96)
p= 0.5
q=0.5
e= error esperado (0.05)
N= población total

(Durán & Vélchez, 2009)

B) Caracterización de los residuos sólidos

En la presente investigación se decidió implementar una metodología a pequeña escala para caracterizar la basura de La Ceiba, que sirva como referencia para futuras investigaciones. Dicha metodología consiste en la obtención de 10 muestras de residuos sólidos residenciales de diferentes sectores de la ciudad. Una vez obtenida las muestras se procederá a realizar un trabajo de clasificación de cada muestra de basura obtenida en cada vivienda, donde se separará en material orgánico, plásticos, vidrios, metales, papel, entre otros. Luego, utilizando la herramienta de Excel para acumulación de datos y cálculos, se realizó un proceso de pesaje en kilogramos [kg] de cada muestra obtenida de acuerdo con su clasificación y un pesaje total de cada una de las muestras. Con base en lo anterior, se obtendrá un peso promedio por vivienda para cada tipo de residuo sólido en La Ceiba, Atlántida. Dichos promedios se multiplicarán por la cantidad de viviendas que hay en el municipio de La Ceiba para calcular la generación aproximada de residuos sólidos en el sector residencial según las diferentes clasificaciones. Obteniendo así una tabla de categorización de los residuos sólidos residenciales en La Ceiba.



1) Se recolectó muestras de 10 bolsas de basura en 10 viviendas de diferentes sectores de la ciudad. 2) Se separó la basura recolectada según su clasificación. 3) Proceso de caracterización final.

Figura 1. Proceso de la Caracterización de los Residuos Sólidos.



Se procedió a pesar los residuos sólidos según su clasificación.

Figura 2. Proceso de Pesaje de los Residuos Sólidos.

Fuente: Elaboración Propia.

C) Producción per cápita

La producción per cápita (PPC) es un valor utilizado para la estimación de la producción total de residuos sólidos en un sector determinado. Para poder calcular la producción

per cápita, la producción total de La Ceiba y el porcentaje de cada residuo sólido se utilizarán las siguientes fórmulas:

$$PPC = \frac{\text{Peso Total Promedio [kg]}}{\# \text{ Habitantes del Municipio}}$$

Ecuación 3. Producción Per Cápita.

(Durán & Vélchez, 2009)

D) Cuantificación de los residuos sólidos municipales

Una vez se calcula la generación total de residuos sólidos y se obtiene el porcentaje según su clasificación, se procede a determinar la cantidad total expresada en kilogramos o toneladas que corresponden a cada tipo de residuo sólido. Para calcular el porcentaje de residuos sólidos municipales según sus diferentes clasificaciones se utilizará la siguiente ecuación.

$$\text{Tipo de Residuo Sólido} = \frac{\text{Peso del Tipo de Residuo [kg]}}{\text{Peso Total de los Residuos [kg]}}$$

Ecuación 4. Tipo de Residuo Sólido.

(Durán & Vélchez, 2009)

2. Determinar el potencial energético del biogás en la materia orgánica.

A) Porcentaje de humedad y poder calorífico de los residuos sólidos

Con base en los resultados de las muestras recolectadas y sus pesajes, se procederá a analizar la humedad de la materia orgánica, el poder calorífico utilizando el método analítico debido a que no se pudo contar con un calorímetro para hacer el análisis. Las fórmulas que se utilizarán para calcular el porcentaje de humedad de la materia orgánica y el poder calorífico (método analítico) son las siguientes:

$$\%H = \frac{(B - A) - (C - A)}{(B - A)} \times 100$$

Ecuación 5. Porcentaje de Humedad.

Donde:

- %H = Porcentaje de Humedad
- A = Peso Cápsula Seca
- B = Peso Cápsula + Muestra Húmeda
- C = Peso Cápsula + Muestra Seca

(Gutiérrez Vargas, 2016)



1) Se peso la materia orgánica húmeda. 2) Se metió al horno por dos horas a 100 °C. 3) Se peso la materia orgánica seca.

Figura 3. Procedimiento para Calcular el Porcentaje de Humedad.

Fuente: *Elaboración Propia.*

$$PCI = PCS - 597 \times (9\% + \%H)$$

Ecuación 6. Poder Calorífico Interno.

$$PCS = (\%MateriaOrgánica + \%Madera + \%Papel + \%Textil + \%Ordinario - \%H) \times 4,000 + (\%Plástico + \%Caucho + \%Cuero) \times 9,000$$

Ecuación 7. Poder Calorífico Superior.

(Montoya, 2020)

B) Tiempo de retención hidráulico

El tiempo de retención hidráulico se define como la cantidad de días que la materia prima necesita para su proceso de digestión anaeróbica. Este cálculo está relacionado directamente con la temperatura y el tipo de materia prima que se está utilizando.

Tabla 1. Tiempo de Retención Hidráulico.

Región	Temperatura ambiente	Temperatura de trabajo	Altura sobre el nivel del mar [msnm]	Tiempo de retención [días]
Altiplano	-12 a 20°C	6-16°C	2,900-4,500	60
Valle	5-30°C	15-30°C	1,800-2,900	30
Trópico	13-38°C	25-30°C	0-1,800	20

Fuente: *Elaboración propia con datos obtenidos de (Herrero, 2008)*

C) Potencial energético del biogás

Para determinar el potencial energético del biogás a partir de los residuos orgánicos municipales, se procedió a implementar la siguiente metodología. Se realizó una simulación del proyecto con base en 21 litros de mezcla compuesta de materia orgánica triturada, agua, estiércol de vaca como bacterias e inóculo (con una semana de fermentación). El inóculo se preparó con una muestra 0.80 kg de materia orgánica húmeda sellada para eliminar el oxígeno y acelerar el proceso de descomposición mediante la digestión anaeróbica. La simulación se hizo utilizando dos botellones de cinco galones donde se agregaron 10.5 litros de mezcla a cada uno para hacer el total de 21 litros. Luego se sellaron los biodigestores en un tiempo de retención hidráulica de 30 días a una temperatura de fermentación mesofílica de 25 – 35 °C.



1) Se trituró la materia orgánica recolectada de las muestras. 2) La materia orgánica triturada se almacenó en dos botes de 3 lts, pesando 2.50 kg cada una. 3) Se realizó el armado de el biodigestor tipo Batch para la simulación de producción de biogás. 4) Elaboración de los biodigestores tipo Batch finalizado.

Figura 4. Preparativos para Simulación de Producción de Biogás.

Fuente: *Elaboración Propia.*

D) Variables de medición

A) pH

Para la realizar las mediciones de pH de la mezcla del biodigestor se utilizará el método de la Col Lombarda. Este método es posible debido a que la col morada tiene unos pigmentos llamados antocianinas que permiten que el extracto líquido cambie de color de acuerdo con el pH de la sustancia. (Ciencia bit: Ciencia y Tecnología., 2015)

B) Temperatura

Para la medición de la temperatura de nuestra mezcla haremos uso de un termómetro de mercurio. Estas mediciones se realizarán al mismo tiempo que se realicen las mediciones de pH.

C) Producción de biogás

En la presente investigación se estará midiendo la producción de biogás diariamente utilizando el método de la probeta invertida. Este método nos permitirá medir el volumen de producción diario del biogás que produce el biodigestor.

3. Identificar la localización del vertedero municipal.

En la presente investigación se hará utilización de las imágenes satelitales proporcionadas por la aplicación Google Earth como metodología para localizar y georreferenciar la ubicación del vertedero municipal de La Ceiba.

4. Determinar la demanda Eléctrica de La Ceiba, Atlántida.

La metodología que se utilizará para la obtención de la demanda eléctrica de La Ceiba será mediante entrevistas. Se procederá a realizar trabajo de investigación realizando Entrevista y sesiones de trabajo directamente con el Departamento de Altos Consumidores de la Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE).

5. Diseñar la planta de generación eléctrica.

A) Carga de mezcla diaria

La carga de mezcla diaria hace referencia a las cantidades de materia orgánica que se mezclarán con el agua. Se debe calcular la cantidad de agua que será mezclada con la materia orgánica para luego proceder a realizar los cálculos del volumen total del biodigestor. La mezcla diaria depende del diseño de biodigestor que se

utilice y el porcentaje de biogás que se desee obtener dentro del biodigestor. Las relaciones más comunes son 80:20 o 90:10, el primer dato indica el volumen de mezcla dentro del biodigestor y el segundo dato el volumen de biogás dentro del biodigestor.

$$V_{H_2O} = \frac{(X_1)(\%ST) - (X_2)}{1000 \text{ kg/m}^3}$$

Ecuación 8. Volumen del agua

Donde:

- V_{H_2O} = Volumen del agua
- X_1 = Cantidad de materia orgánica
- $\%ST$ = Sólidos Totales [%]
(Gutiérrez Vargas, 2016)

B) Volumen total del biodigestor

El cálculo del volumen total del biodigestor depende de su fase gaseosa y su fase líquida. Por lo general, siempre la fase líquida es mayor que la gaseosa, debido a que por lo general se utilizan dimensiones 90:10 o 80:20 siendo la primera la fase líquida y la segunda la fase gaseosa.

$$V_{total} = V_{gas} + V_{líquido}$$

Ecuación 9 Volumen Total del Biodigestor

En un biodigestor la fase líquida comprende de tres cuartas partes del volumen total del biodigestor o mediante a multiplicación entre la carga diaria y el tiempo de retención hidráulica.

$$V_{líquido} = \text{TiempoRetención} \times \text{CargaDiaria}$$

Ecuación 10 Volumen Líquido del Biodigestor

Mientras que la fase gaseosa de nuestro biodigestor comprende de la cuarta parte restante del biodigestor o dividiendo el volumen líquido entre tres:

$$V_{gas} = \frac{V_{líquido}}{3}$$

Ecuación 11 Volumen Gaseoso del Biodigestor

(Herrero, 2008)

C) Producción de biogás

El proceso de producción de biogás se realiza mediante un proceso bioquímico de fermentación anaeróbica dentro del biodigestor donde microorganismos descomponen la materia prima dentro de la mezcla. Primeramente, se hará el cálculo de los sólidos totales que representa la cantidad de materia orgánica seca y los sólidos volátiles que es la cantidad de materia transformada por las bacterias, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$ST = \text{CargaDiaria} \times \frac{\%SólidosTotales}{V_{líquido}}$$

Ecuación 12. Sólidos totales dentro del biodigestor

$$SólidosVolátiles = SólidosTotales \times \%SólidosVolátiles$$

Ecuación 13. Sólidos volátiles dentro del biodigestor.

Una vez obteniendo la cantidad de sólidos volátiles y totales de nuestro biodigestor se procede a realizar el cálculo de la cantidad de biogás que se produce diariamente, utilizando la siguiente ecuación como referencia:

$$\text{ProducciónBiogás} = 0.27 \times SV$$

Ecuación 14. Cantidad de biogás producida diario (Herrero, 2008)

D) Diseño de la zanja

La zanja es el espacio donde se colocará el biodigestor que se utilizará en la presente investigación. Para su correcto dimensionamiento se necesita calcular la profundidad y el ancho superior e inferior de la zanja. Para realizar los cálculos del diseño de la zanja y el diseño de la planta de biogás se hará uso del manual de la Fircó.

Entre algunas de las especificaciones técnicas para el diseño de los biodigestores tipo laguna según (IRRI, 2014), se encuentran los siguientes:

- Las esquinas en la cubierta del biodigestor deben formarse a partir de ángulos rectos, para asegurar que la geomembrana esté bien sellada.
- La corona del biodigestor debe tener al menos tres metros de ancho a cada lado para permitir el paso de la maquinaria y estar compactada un 85 – 90%.
- Para anclar la geomembrana a la corona se deberá realizar una zanja de 0.5 m de ancho x 0.9 m de profundidad a lo largo de todo el perímetro del biodigestor, a una distancia de 1 m desde el inicio de la pendiente interior
- Se debe evitar el crecimiento de vegetación alrededor del marco perimetral del biodigestor, para esto se puede utilizar herbicidas o mantener el área libre de malezas y plantas no deseadas.

E) Calcular las emisiones de CO₂ que generará nuestra planta.

Una vez se obtienen los resultados de la factibilidad técnica del proyecto de generación eléctrica a partir de biomasa utilizando la materia orgánica de los residuos sólidos municipales para producir biogás, se procede a realizar un análisis de las emisiones de CO₂ que el proyecto genera para poder medir de esa manera la huella de carbono.

$$\text{Emisiones de CO}_2 = \text{kWh anualmente producidos} \times 0.181 \text{ g de CO}_2/\text{kWh}$$

Ecuación 15. Emisiones de CO₂.

(Oficina Catalana del Canvi Climatic, 2011)

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo de nuestra investigación se estará dando los resultados de cada uno de los cálculos y procesos presentados en la metodología que nos ayudarán a

responder cada uno de los objetivos planteados. Así mismo, se procederá a realizar un análisis que nos permita evaluar nuestro proyecto desde el punto de vista técnico y ambiental.

A. Caracterización de los residuos sólidos

a) Tamaño de la muestra.

Para realizar el cálculo del total de viviendas se hizo uso de la ecuación 1, donde la población total de La Ceiba es de 214,917 habitantes y utilizando un promedio de habitantes por vivienda de cinco personas.

$$\text{Total de viviendas} = \frac{\text{Población Total del Municipio}}{\text{Promedio de Habitantes por vivienda}}$$

$$\text{Total de viviendas} = 42,983 \text{ viviendas}$$

Luego, se procedió a obtener el tamaño de la muestra utilizando la ecuación 2. Por motivos de tiempo en la presente investigación se realizó un muestreo a pequeña escala en el sector residencial recolectando 10 muestras de 10 viviendas de diferentes colonias de la ciudad con la finalidad de obtener un peso promedio de cada residuo sólido producido.

$$n = \frac{k^2 \times p \times q \times N}{(e^2 \times (N - 1)) + k^2 \times p \times q}$$

$$n = 385 \text{ muestras}$$

En la presente investigación se consideraron solamente 10 muestras por la limitante de sólo contar con seis semanas para la recolección de residuos sólidos para su posterior análisis. Para poder realizar un estudio más detallado se estima que se necesitan un total de muestreo de 385 muestras.

b) Caracterización de los Residuos Sólidos Municipales.

Para caracterizar la basura se procedió a separar y pesar cada residuo sólido recolectado según su clasificación. Una vez se concluyó con el pesaje de cada tipo de residuo sólido se procedió a sacar el peso promedio de cada muestra según tu clasificación.

Tabla 2. Peso de Residuos Sólidos con base en las Muestras.

N	Número de Personas	Muestras Residenciales	Peso M. Orgánica [kg]	Peso vidrio [kg]	Peso Papel [kg]	Peso Plástico [kg]	Peso Metal [kg]	Peso Total [kg]
1	5	Muestra A	1.021	0	0.113	0.227	0	1.361
2	5	Muestra B	1.021	0	0.159	0.038	0	1.217
3	2	Muestra C	0.599	0	0.113	0.113	0.172	0.998
4	5	Muestra D	0.739	0	0.141	0.227	0.032	1.139
5	4	Muestra E	6.350	0	0.454	0.454	0.172	7.430
6	2	Muestra F	0.680	0	0.014	0.091	0.000	0.785
7	5	Muestra G	2.409	0.454	1.021	0.227	0.113	4.223
8	2	Muestra H	1.021	0	0.572	0.141	0.000	1.733
9	5	Muestra I	0.830	0.532	0.159	0.113	0.180	1.814
10	5	Muestra J	1.040	0	0.025	0.227	0.120	1.412
Promedio de muestras			1.571	0.099	0.277	0.186	0.079	2.211

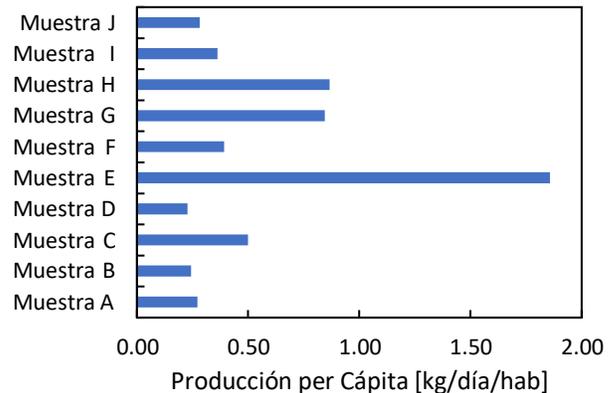
Fuente: Elaboración Propia.

Nota: La muestra número cinco se tomó con base en día de limpieza de nevera, con la finalidad de mostrar cómo la producción de residuos sólidos puede variar según los días.

Por lo general, los días de limpieza de nevera son los días donde más se recolecta materia orgánica.

c) Producción Per Cápita de La Ceiba, Atlántida.

Con el resultado de las muestras recolectadas, se procedió a calcular mediante la ecuación 3, la producción per cápita de cada muestra utilizando como variable el peso total



de la muestra y la cantidad de personas que viven en la vivienda. Donde se puede observar que la producción por habitante al día varía en cada hogar.

Figura 5. Producción per Cápita de las Muestras.

Fuente: Elaboración Propia.

Igualmente, se procedió a sacar la producción per cápita de residuos sólidos en el municipio de La Ceiba, Atlántida. Con una población total de 214,917 habitantes en La Ceiba se estima una producción total de 150 toneladas de residuos sólidos diariamente.

$$PPC = \frac{\text{Peso Total Promedio [kg]}}{\# \text{ Habitantes del Municipio}}$$

$$PPC = 0.70 \text{ kg} * \text{día} * \text{hab}$$

d) Cuantificación de Residuos Sólidos.

Para calcular el porcentaje de Residuos sólidos según su tipo se procedió a utilizar la ecuación 5. Donde se pudo obtener una gráfica, con el porcentaje de cada residuo sólido según su tipo. Así mismo, se pudo proyectar el porcentaje de residuos sólidos general de La Ceiba, para obtener una gráfica piloto de la primera caracterización de residuos sólidos en el municipio. Con base en las muestras se pudo obtener que de 22.11 kg de residuos sólidos, el 71.05% representaba la materia orgánica, el 12.53% la papel y cartón, 8.4% los plásticos, 4.46% los vidrios y el 3.27% los metales de lata. La cual al proyectarse con las 150 toneladas que se recolectan en La Ceiba y la cantidad de viviendas de dicha ciudad, la materia orgánica viene representando un 45.02% aproximado del 100% de los residuos sólidos de La Ceiba, Atlántida, Honduras.

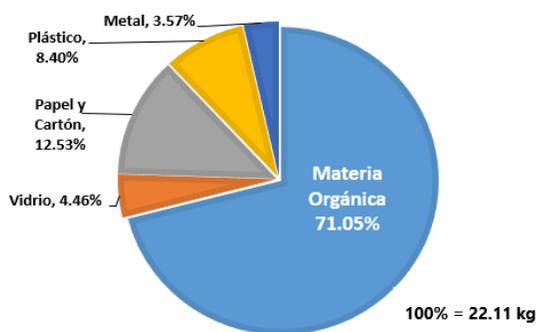


Figura 6. Caracterización de los Residuos Sólidos (Muestras).
Fuente: Elaboración Propia.

Para realizar la proyección para la caracterización de los residuos sólidos municipales se procedió a multiplicar el valor de peso promedio de cada tipo de residuo sólido por la cantidad de viviendas que hay en La Ceiba.

Tabla 3. Cantidades de Residuos Sólidos por tipo en La Ceiba.

Cantidad de Residuos Sólidos por Tipo en La Ceiba		
Materia Orgánica	67.52	T* día
Vidrio	4.24	T* día
Papel y Cartón	11.91	T* día
Plástico	7.98	T* día
Metal	3.40	T* día
Total de Viviendas	42,983	Viviendas



Figura 7. Caracterización de los Residuos Sólidos en La Ceiba.

Fuente: Elaboración Propia.

B. Potencial energético del biogás

a) Porcentaje de Humedad.

Para realizar el cálculo del porcentaje de humedad de los residuos sólidos municipales se procedió a utilizar la ecuación 6. Donde se procedió a pesar la cápsula seca, la muestra húmeda y la muestra seca luego de ser horneada por 2 horas a una temperatura de 100°C.

$$\%H = \frac{(B - A) - (C - A)}{(B - A)} \times 100$$

$$\%H = 64.3\%$$

Los resultados muestran que nuestros residuos sólidos tienen un porcentaje de humedad del 64%, obteniendo un porcentaje de sólidos totales de 36%.

b) Poder Calorífico (Método Analítico)

Para realizar el cálculo del poder calorífico de los residuos sólidos de las muestras se procedió a utilizar el método analítico por medio de las ecuaciones 7 y 8.

$$PCI = PCS - 597 \times (9\% + \%H)$$

$$PCI = 478.48 \text{ MJ/kg}$$

$$PCS = (\%MateriaOrgánica + \%Madera + \%Papel + \%Textil + \%Ordinario - \%H) \times 4,000 + (\%Plástico + \%Caucho + \%Cuero) \times 9,000$$

$$PCS = 639.39 \text{ MJ/kg}$$

c) Tiempo de Retención Hidráulico

El tiempo de retención hidráulico depende de la temperatura del ambiente de la región. En La Ceiba la temperatura ambiente varía en un rango de 19 °C a 31 °C por lo que se concluyó que el tiempo de retención hidráulico óptimo para el proyecto es de 20 a 30 días, seleccionando 30 días como el tiempo a utilizar. El tiempo de retención hidráulico es una variable que determina el tiempo en el cual nuestra mezcla de materia orgánica y agua estarán dentro del biodigestor para realizar el proceso bioquímico de fermentación anaeróbica. Después del tiempo de retención hidráulico se expulsará la mezcla a una laguna de oxidación y se utilizará como inóculo para las próximas mezclas.

d) Variables de Medición.

1) Temperatura y pH.

Se procedió a medir el pH y la temperatura de la mezcla durante 30 días que fue el tiempo de retención hidráulico seleccionado para nuestra simulación de biodigestor para poder evaluar cómo se comportaban las variables diariamente. La Ceiba es una región tropical con temperaturas entre 19 a 31 °C. Debido a situaciones climatológicas las temperaturas en la actualidad varían en un rango de 19 a 25 °C. El pH de nuestra mezcla se comportó bastante neutra variando en un rango de pH de 6.5 – 7.5.

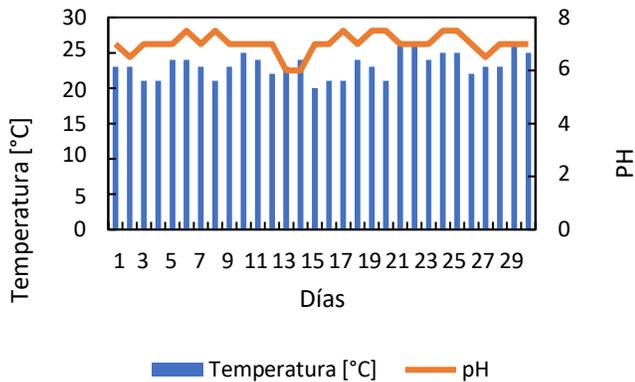


Figura 8. Temperatura y pH de la Mezcla.

Fuente: Elaboración Propia.

2) Producción de Biogás.

Se realizó una simulación de biodigestor utilizando un biodigestor tipo Batch para conocer si en efecto la materia orgánica de los residuos sólidos municipales puede producir biogás. Donde se utilizó 0.8 kg de materia orgánica para alimentar el biodigestor durante un tiempo de retención hidráulico de 30 días donde se logró alcanzar una producción diaria de 0.301 L de biogás y una producción acumulada de 2.57 L de biogás. A continuación, se puede observar el comportamiento de la producción de biogás donde desde el día cinco empezó el proceso de producción.

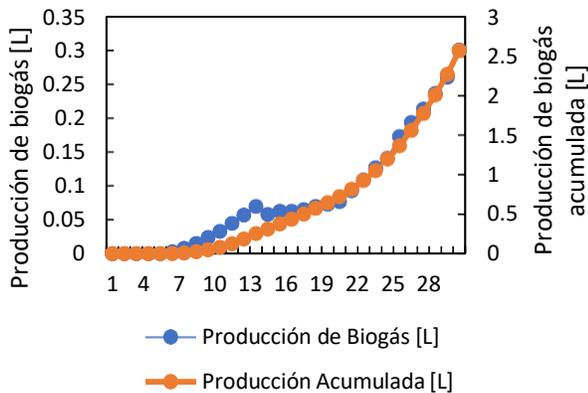


Figura 9. Producción de Biogás de la Simulación.

Fuente: Elaboración Propia.

C. Localización del vertedero municipal.

Para obtener la localización del vertedero municipal se utilizó las imágenes satelitales de Google Earth. El vertedero municipal de La Ceiba, Atlántida se ubica frente a la Residencial Alameda en la parte alta, a 0.39 km de la Cervecería Hondureña de La Ceiba, Atlántida, Honduras. El vertedero cuenta con un área de 28,815 m² y un perímetro de 839 m. Utilizando como referencias el formato UTM el vertedero se encuentra geográficamente en las siguientes coordenadas, X = 523998.00, Y = 1742596.00.



Figura 10. Localización del vertedero Municipal de La Ceiba, Atlántida.

Fuente: Google Earth

D. Demanda eléctrica de La Ceiba

En la presente sección, se procederá a mostrar los resultados obtenidos mediante la entrevista realizada en el departamento de altos consumidores de la Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE). Donde se pudo conocer que La Ceiba tiene una demanda eléctrica de 70 MW.

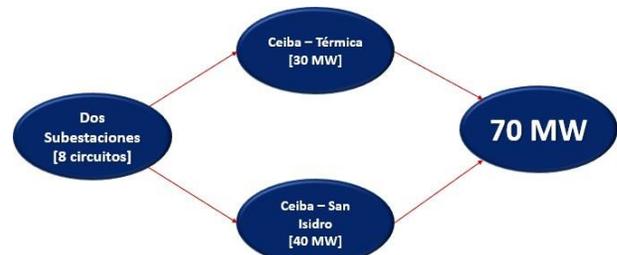


Figura 11. Demanda de Energía Eléctrica en La Ceiba.

Fuente: Elaboración Propia con base en (Comunicación Personal, 2022).

E. Diseño de la planta de generación eléctrica

a) Carga de Mezcla Diaria

Para obtener el cálculo de la carga diaria del biodigestor dependerá de la cantidad de materia prima que se tiene disponible en los residuos sólidos del vertedero municipal de La Ceiba. Al vertedero municipal de La Ceiba le llegan 150 toneladas de residuos sólidos diariamente donde el 45% de los mismos es materia orgánica. Con base en ese dato se estima que la materia prima disponible para alimentar diariamente a los biodigestores es de 67.5 toneladas de materia orgánica (67,500 kg), a la cual se le debe agregar 175,500 litros de agua teniendo una carga diaria total de 243,000 litros. En la presente planta se usarán dos biodigestores tipo laguna con capacidad de 35 toneladas por unidad. Por lo que ambos biodigestores se estarán llenando con carga diaria de 121,500 litros de mezcla.

b) *Volumen Total del Biodigestor*

Los Biodigestores tipo laguna tienen una relación líquida – gaseosa de 75:25, es decir, 75% volumen líquido y el 25% restantes es donde se almacenará el biogás. Utilizando la ecuación a continuación se calculará el volumen líquido de cada uno de los biodigestores.

$$Vl = 30 \times 121,500 L$$

$$Vl = 3,645 m^3$$

Al obtener el volumen líquido de los biodigestores se procedió a calcular el volumen gaseoso utilizando la siguiente ecuación que indica que el volumen gaseoso es el 25% del volumen líquido.

$$Vg = \frac{3,645 m^3}{3}$$

$$Vg = 1,215 m^3$$

Al tener el resultado del volumen de la fase líquida y gaseosa de cada biodigestor se procedió a calcular el volumen total de los biodigestores que representa la suma entre ambas fases.

$$Vt = 1,215 m^3 + 3,645 m^3$$

$$Vt = 9,720 m^3$$

c) *Producción de Biogás Estimada*

Para poder calcular la producción de biogás que cada biodigestor producirá diariamente se requiere realizar los cálculos de los sólidos totales y los sólidos volátiles de la mezcla. Considerando que se calculó que la materia orgánica tiene un porcentaje de 36% de sólidos totales, se procedió a calcular la cantidad de sólidos totales con la ecuación a continuación:

$$ST = 121,500 kg \times \frac{36\%}{3,645 m^3}$$

$$ST = 12 kg/m^3$$

Para realizar el cálculo de los sólidos volátiles, se consideró el porcentaje de sólidos volátiles que tiene las bacterias que se utilizaron para descomponer la materia orgánica, en este caso estiércol de vaca.

$$SV = 12 \times 77\%$$

$$SV = 9.24 kg/m^3$$

Con la obtención de la cantidad de sólidos volátiles y con el valor del factor de conversión del estiércol de vaca utilizado como bacteria para la descomposición de la materia orgánica. (Herrero, 2008) Se puede calcular un estimado de cuánto biogás producirá nuestro biodigestor, utilizando la siguiente fórmula:

$$PB = 0.27 \times 9.24 kg/m^3$$

$$PB = 2.495 m^3_{biogás} / m^3_{VL} / día$$

d) *Diseño de la Zanja*

Para el presente proyecto se decidió utilizar un biodigestor tipo laguna donde según el manual de la IIRRI (Instituto Internacional de Recursos Renovables) afirma que la zanja debe tener una profundidad de siete metros, pudiendo ser sobre el nivel de suelo o por debajo. Igualmente indica que se debe utilizar un talud de 1:3. (Tyra, 2014)

Para el Dimensionamiento de la planta de generación de biogás se realizó un esquemático similar al de un proyecto de biodigestores tipo laguna de el Negrito, Yoro. Este proyecto consta de dos biodigestores que almacenan 65 toneladas de mezcla entre ambos con una longitud de 30 metros y un ancho de 20 metros cada uno. Cada biodigestor consta de cuatro agitadores que permiten que los sólidos no se peguen en el fondo del biodigestor. Igualmente, el proyecto constará de una fosa de mezclado, una laguna de oxidación, una fosa de neutralización y dos biodigestores etapa A previos a los biodigestores tipo laguna donde la mezcla estará almacenada por siete días para prevenir acidificación de la materia prima. La mezcla se transportará entre las fosas utilizando bombas de extracción. Una vez finalizada la producción del biogás ésta será transportada mediante tuberías a un limpiador de gases y un filtro de gases para mantener la pureza del metano y no permitir que otros gases dañen el generador eléctrico. El proyecto constará de un generador eléctrico de 240 kW. (AGRACONSA, 2010)

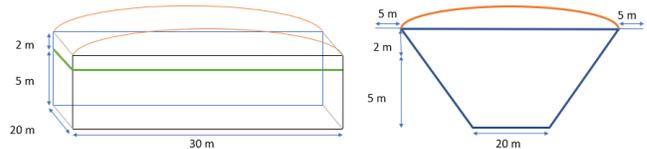


Figura 12. Diseño de Biodigestor tipo Laguna.

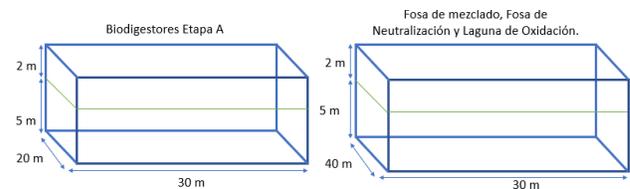


Figura 13. Diseño de Fosas.

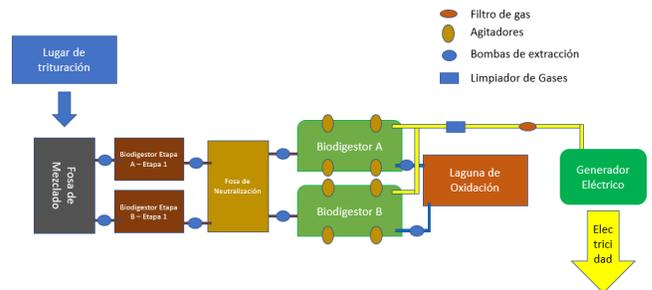


Figura 14. Diseño de Planta de Biogás.

Fuente: Elaboración Propia.

La estimación de producción total de energía prevista para la planta de biogás utilizando el generador de 240 kW es de 5,760 kWh diarios, 172,800 kWh mensuales y 2,073,600 kWh al año. Por lo que se estima que la planta de generación eléctrica a partir de biogás inyecte 2.07 MW de energía anualmente. (AGRACONSA, 2010)

F. Emisiones de CO₂

Utilizando el factor de conversión por consumo energético producido, se estima que las cantidades equivalentes de CO₂ que producirá el presente proyecto serán de 337,789.44 kg de CO₂ anualmente.

$$\begin{aligned} \text{Emisiones de CO}_2 &= \text{kWh anualmente producidos} \\ &\quad \times 0.181 \text{ g de CO}_2/\text{kWh} \\ \text{Emisiones de CO}_2 &= 2,073,600 \text{ kWh anuales} \\ &\quad \times 0.181 \text{ kg de CO}_2/\text{kWh} \\ \text{Emisiones de CO}_2 &= 375,321.6 \text{ kg de CO}_2 \text{ anuales.} \end{aligned}$$

IV. CONCLUSIONES

En la presente investigación se realizó un trabajo de caracterización de residuos sólidos a pequeña escala para conocer el comportamiento de los residuos sólidos en la ciudad de La Ceiba, Honduras y a su vez se procedió a evaluar la factibilidad técnica de la materia orgánica de los residuos sólidos para la producción de biogás. Así mismo, se realizó un esquema de la planta de biogás y el diseño de las fosas apoyado de un proyecto de biodigestores en El Negrito, Yoro, Honduras y el manual de la Firco de México. Para caracterizar la basura se realizó un trabajo de campo de recolección de basura, donde se clasificó y se pesó. Luego se procedió a proyectarla de acuerdo con la cantidad de viviendas y residuos sólidos municipales que se recolectan diariamente en La Ceiba, Atlántida. Para evaluar la viabilidad técnica del proyecto se realizó una simulación de biodigestor para corroborar la producción de biogás utilizando la materia orgánica como materia prima. En la presente investigación se encontraron los siguientes resultados:

- Con base en las muestras realizadas, se proyectó que, de las 150 toneladas de residuos sólidos municipales originados en La Ceiba, Atlántida, el 45.02% pertenecía a la materia orgánica, el 7.94% al papel y cartón, el 5.32 a los plásticos y el 2.26% a los metales de lata. El 59.64% restante pertenece a otros orígenes de residuos sólidos.
- Los residuos sólidos de La Ceiba tienen un porcentaje de humedad de 64% y un poder calorífico interior de 478.48 MJ/kg. Con base en la simulación de biodigestor se determinó que con 0.8 kg de materia orgánica se logró generar una producción diaria de 0.301 litros de biogás y una producción acumulada de 2.57 litros de biogás.
- La Ceiba, Atlántida cuenta con solo un vertedero municipal localizado en la colonia Basurero, ubicada enfrente de la residencial Alameda.

- La demanda eléctrica máxima de La Ceiba, Atlántida es de 70 MW distribuida en dos subestaciones con ocho circuitos de distribución.
- Con base en las 67.53 toneladas de materia orgánica que se recolectan diariamente en el vertedero municipal de La Ceiba, Atlántida, se diseñó una planta de biogás alimentada por dos biodigestores de tipo laguna de 35 toneladas que generarán un total de 25,408.16 litros de biogás diarios produciendo 172,800 kWh al mes.
- Con base en la generación de energía se calculó que la planta de biogás generará 375,321.6 kg de CO₂ anualmente.

En la presente investigación se presentó la siguiente limitante: No se pudo disponer de un calorímetro para medir el poder calorífico de los residuos sólidos municipales debido a que los calorímetros locales no se encontraban en buen estado. Por lo que se procedió a utilizar el método analítico para realizar el cálculo del poder calorífico superior e inferior de los residuos sólidos para obtener un resultado aproximado. Para futuras investigaciones se recomienda utilizar un calorímetro para evaluar el potencial energético de los residuos sólidos para tener resultados más exactos.

A pesar de la limitación anterior, el propósito de la presente investigación es que sirva como referencia para futuras investigaciones para poder tener una metodología para realizar cálculos para la caracterización de residuos sólidos municipales y a su vez aprovechar la materia prima como recurso energético primario para la producción de biogás que se utilice como combustible para la generación de electricidad.

V. REFERENCIAS

- [1] AGRACONSA. (2010). *Proyecto de Biodigestor en el Negrito, Yoro.* file:///C:/Users/curacao/Downloads/HO%205.23%20Informe%20final%20(3).pdf
- [2] Andrés Montoya. (2020, mayo 14). *Cálculo del PCI de un residuo sólido por medio analítico.* <https://www.youtube.com/watch?v=uDXHtFEavAs>
- [3] Oficina Catalana del Canvi Climatic (2011) *GUÍA PRÁCTICA PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)* <https://www.caib.es/sacmicrofront/archivopub.do?ctrl=MCRST234ZI97531&id=97531>
- [4] *Caracterización de los Residuos Sólidos en el Municipio de San Antonio de Oriente, Honduras.* (2009). 36.
- [5] *Ciencia bit: Ciencia y Tecnología.* (2015, noviembre 16). *Indicador de pH de Col Lombarda. Experimentos de Química.* <https://www.youtube.com/watch?v=94RILZdh2Rk>
- [6] Fernández, J. L. A. (2010). *Artículo publicado originalmente en la revista de Ingeniería Civil, edición 496, agosto 2010.* 9.

- [7] *Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico* | Publications. (2022). Recuperado 11 de marzo de 2022, de <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>
- [8] Herrero, J. M. (2008). *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*. Jaime Martí Herrero.
- [9] Lokey, D. E. (2019). *Las fotografías son cortesía de: 157*.
- [10] Montiel-Bohórquez, N. D., Pérez, J. F., Montiel-Bohórquez, N. D., & Pérez, J. F. (2019). *Generación de Energía a partir de Residuos Sólidos Urbanos. Estrategias Termodinámicas para Optimizar el Desempeño de Centrales Térmicas*. *Información tecnológica*, 30(1), 273-284. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000100273>
- [11] Rubiano, J. (2010) *Energía de la basura” donde evalúa a la basura como recurso para generación de energía eléctrica Nariño*. Bogotá, Colombia. James.valencia@uan.edu.co. 14, 8.
- [12] Santiago Gutiérrez Vargas | *Biogás | Energía renovable*. (2016). *INTENSIFICACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE BIOMETANO A PARTIR RESIDUOS DE FRUTAS Y VERDURAS DE UNA CENTRAL DE ABASTOS* [https://es.scribd.com/document/410712362/santiago-o-Gutiérrez-Vargas-pdf](https://es.scribd.com/document/410712362/santiago-Gutiérrez-Vargas-pdf)
- [13] tyra. (2014, julio 13). «PROGRAMA CURSO FORTALECIMIENTO INSTITUCIONAL SISTEMAS DE BIODIGESTIÓN». Slide Serve. <https://www.slideserve.com/tyra/programa-curso-fortalecimiento-institucional-sistemas-de-biodigestion>
- [14] Berger, Louis (2015). *Proyecto de Generación de Energía a partir de Residuos Sólidos y de Recuperación de Recursos Declaración de Impacto Ambiental* https://www.rd.usda.gov/sites/default/files/UWP_S_R_Spanish_InformeResumenA.pdf
- [15] Matulic, I. (2003). *Introducción a los Sistemas Eléctricos de Potencia*. *Acta Nova*, 2(2), 208–215.
- [16] López, J. L. F. *ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS*. 104. *Marco Legal de los Residuos Sólidos.pdf*. Retrieved January 19, 2022, from <https://www.paho.org/hon/dmdocuments/Marco%20Legal%20de%20los%20Residuos%20Sólidos.pdf>
- [17] *Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico* | Publications. Retrieved March 11, 2022, from <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>
- [18] *Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico* | Publications. Retrieved January 27, 2022, from <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>