

# SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Sistema de generación de energía eléctrica a partir de residuos orgánicos disponibles en la Plaza de Mercado Guarín en Bucaramanga, Santander: diseño conceptual y estudio de prefactibilidad

Juliana Hincapie Bisbicus y Mayra Jimena Sánchez Jaimes

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Químico

Modalidad Investigación

Director

Omar Andrés Benavides Prada

Prof. Escuela de Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

### **Dedicatoria**

A mi abuelita, Alicia María Páez León,

quien partió dejando un vacío irreparable, pero también un legado de amor, sabiduría y fortaleza que me acompañará por siempre. Este logro es tuyo también, porque en cada paso de este camino llevé conmigo tus enseñanzas, tu sonrisa, tu amor y dulzura y la certeza de que desde donde estés, sigues cuidándome y sintiendo ese orgullo por mí que tanto me recalabas.

Gracias por creer en mí cuando más lo necesité. Este trabajo es mi forma de honrar tu memoria y todo lo que representaste en mi vida.

Con amor eterno,

Mayra Jimena Sánchez Jaimes.

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

### **Agradecimientos**

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo incondicional de quienes han sido mi fortaleza en los momentos más difíciles.

A mi familia, por ser mi refugio y mi motor, por cada palabra de aliento, por comprender mis ausencias y celebrar cada pequeño avance como si fuera propio.

A mis amigos, esos hermanos que la vida me regaló, por su paciencia infinita, por escucharme, por acompañarme en las noches largas y por recordarme que siempre hay luz al final del camino. Su presencia hizo este viaje más llevadero y significativo.

A mi director, por su guía experta, su dedicación y su compromiso con mi formación académica. Gracias por compartir su conocimiento, por su paciencia ante mis dudas y por impulsar este proyecto con rigor y confianza.

A todos ustedes, gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Con cariño,

Mayra Jimena Sánchez Jaimes.

**Tabla de contenido**

<b>Introducción</b> .....	<b>13</b>
<b>1. Objetivos</b> .....	<b>15</b>
1.1. Objetivo general .....	15
1.2. Objetivos específicos.....	15
<b>2. Marco conceptual</b> .....	<b>16</b>
2.1. Residuos orgánicos biodegradables .....	16
2.2. Biogás.....	16
2.3. Residuos orgánicos biodegradables .....	16
2.4. Biodigestor .....	17
<b>3. Estado del arte</b> .....	<b>18</b>
<b>4. Metodología</b> .....	<b>20</b>
4.1. Estimación de residuos y demanda energética.....	20
4.2. Caracterización y diseño del sistema de biogás .....	21
4.3. Evaluación económica del proyecto.....	21
<b>5. Resultados</b> .....	<b>22</b>
5.1. Recopilación de información .....	22
5.2. Estimación de la producción de biogás .....	24
5.2.1. Selección de la alternativa de diseño.....	24
5.2.2. Caracterización fisicoquímica del sustrato .....	27

SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	5
5.2.3. Cálculos de producción de biogás .....	30
5.3. Descripción general del proceso.....	32
5.3.1. Pretratamiento químico .....	32
5.3.2. Pretratamiento térmico .....	32
5.3.3. Pretratamiento mecánico .....	33
5.3.4. Selección del biorreactor .....	33
5.3.5. Selección del generador eléctrico .....	35
5.3.6. Disposición final de los subproductos .....	36
5.4. Dimensionamiento teórico de equipos .....	36
5.4.1. Dimensionamiento teórico del biorreactor .....	36
5.4.2. Dimensionamiento teórico del generador eléctrico.....	39
5.5. Cálculo de CAPEX y OPEX .....	40
5.5.1. Gastos de capital (CAPEX).....	40
5.5.2. Costos operativos (OPEX) .....	41
5.6. Análisis financiero.....	42
<b>6. Limitaciones.....</b>	<b>44</b>
<b>7. Conclusiones .....</b>	<b>45</b>
<b>8. Recomendaciones .....</b>	<b>47</b>
<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>48</b>
<b>Apéndices .....</b>	<b>59</b>

# SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

## Tabla de tablas

<b>Tabla 1.</b> Distribución y composición porcentual de residuos orgánicos generados en la plaza .....	24
<b>Tabla 2.</b> Producción de biogás a partir de residuos orgánicos en plazas de mercado o contextos similares.....	25
<b>Tabla 3.</b> Valores teóricos de cenizas, humedad y pH en residuos de frutas y verduras.....	28
<b>Tabla 4.</b> Biorreactores anaerobios para la producción de biogás a presión atmosférica .....	34
<b>Tabla 5.</b> Tecnologías disponibles para la generación de electricidad a partir de biogás .....	35
<b>Tabla 6.</b> Gastos de capital para el montaje del sistema de generación de electricidad a partir de biogás en la Plaza de Mercado Guarín.....	40
<b>Tabla 7.</b> Costos operativos anuales asociados al montaje del sistema de generación de electricidad a partir de biogás en la Plaza de Mercado Guarín.....	41
<b>Tabla 8.</b> Flujo de caja proyectado del sistema de generación de electricidad a partir de biogás en la Plaza de Mercado Guarín .....	42
<b>Tabla 9.</b> Indicadores financieros del sistema de generación de electricidad a partir de biogás en la Plaza de Mercado Guarín .....	43
<b>Tabla A2.</b> Clasificación y cuantificación de residuos orgánicos generados en la plaza.....	60
<b>Tabla A3.</b> Frecuencia de residuos orgánicos en la plaza según su clasificación .....	62

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

**Tabla de figuras**

<b>Figura 1.</b> Diagrama metodológico .....	20
<b>Figura 2.</b> Plano de la Plaza de Mercado Guarín en Bucaramanga, Santander.....	22
<b>Figura 3.</b> Diagrama BFD del proceso de generación de electricidad a partir de biogás.....	32
<b>Figura 4.</b> Visualización gráfica del sistema integral de digestión anaerobia de SISTEMA.bio .....	38
<b>Figura 5.</b> Diagrama PFD del proceso de generación de electricidad a partir de biogás .....	40
<b>Figura A1.</b> Recibo del servicio de luz en el mes de mayo del año 2025 de la administración de la Plaza de Mercado Guarín .....	59

**Tabla de apéndices**

<b>Apéndice A. Residuos orgánicos disponibles y demanda energética .....</b>	<b>59</b>
A.1. Demanda energética de la Plaza de Mercado Guarín.....	59
A.2. Clasificación y cuantificación de los residuos orgánicos disponibles en la Plaza de Mercado Guarín.....	60
A.3. Frecuencia de los residuos orgánicos disponibles en la Plaza de Mercado Guarín .....	62
<b>Apéndice B. Cálculo de indicadores financieros .....</b>	<b>65</b>
B.1. Flujo neto de caja (FNC) .....	65
B.2. Valor actual neto (VAN) .....	65
B.3. Tasa interna de retorno (TIR) .....	66
B.4. Periodo de recuperación de la inversión (payback simple) .....	66

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

**Glosario**

**ANOVA (ANalysys Of VAriance):** análisis de la varianza.

**AGV:** ácidos grasos volátiles.

**BFD (block flow diagram):** diagrama de flujo de bloques.

**BMP (biochemical methane potential):** potencial bioquímico de metano.

**CAPEX (capital expenditure):** gasto de capital.

**CSTR (continuous stirred-tank reactor):** reactor de tanque agitado continuo.

**CSV:** concentración de sólidos volátiles.

**DA:** digestión anaerobia.

**DANE:** Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

**EPA (Environmental Protection Agency):** Agencia de Protección de los Estados Unidos.

**FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations):** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

**FNCER:** fuentes no convencionales de energía renovable.

**FWW (fruit vegetable waste):** residuos de frutas y verduras.

**HSAD (high solids anaerobic digestion):** digestión anaeróbica con alto contenido de sólidos.

**IPC:** índice de precios al consumidor.

**OFMSW (organic fraction of municipal solid waste):** fracción orgánica de residuos sólidos municipales.

**OLR (organic loading rate):** tasa de carga orgánica.

**OPEX (operating expenses):** gastos operativos.

**ORC (organic rankine cycle):** ciclo orgánico de Rankine.

**PCH:** pequeñas centrales hidroeléctricas.

**PFD (process flow diagram):** diagrama de flujo de procesos.

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

**PFR (plug flow reactor):** reactor de flujo pistón.

**PTAR:** planta de tratamiento de aguas residuales.

**ST:** sólidos totales.

**SV:** sólidos volátiles.

**TIR:** tasa interna de retorno.

**TRH:** tiempo de retención hidráulica.

**UASB (upflow anaerobic sludge blanket):** reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos.

**VAN:** valor actual neto

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

### Resumen

**Título:** Sistema de generación de energía eléctrica a partir de residuos orgánicos disponibles en la plaza de mercado Guarín en Bucaramanga, Santander: diseño conceptual y estudio de prefactibilidad\*

**Autores:** Benavides Prada Omar Andrés, Hincapie Bisbicus Juliana, Sánchez Jaimes Mayra Jimena\*\*

**Palabras clave:** Biodigestor, biogás, digestión anaeróbica, Residuos orgánicos biodegradables.

#### **Descripción:**

La investigación propone un diseño conceptual para generar energía eléctrica a partir de residuos orgánicos de la Plaza de Mercado Guarín (Bucaramanga, Santander). Se evaluó la disponibilidad de materia prima, el potencial de biogás y la viabilidad técnica y económica mediante un estudio de prefactibilidad. Se identificó una generación mensual de 39,17 toneladas de residuos, compuestos principalmente por cáscaras y verduras, con un potencial estimado de 99,54 m<sup>3</sup> de biogás diarios, equivalente a 196,45 kWh/día, suficientes para cubrir parcialmente la demanda eléctrica de la administración (2.039 kWh/mes).

En lo económico, el proyecto mostró un VAN positivo, una TIR del 42 % (frente a una tasa de descuento del 8 %) y una recuperación de la inversión en menos de tres años, confirmando su rentabilidad. Así, la valorización energética de residuos orgánicos se presenta como una alternativa técnica y financieramente viable, que aporta a la transición energética local y mejora la gestión de residuos sólidos.

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Omar Andrés Benavides Prada.

**Abstract**

**Title:** Electricity generation system from organic waste available at the Guarín market square in Bucaramanga, Santander: conceptual design and pre-feasibility study\*

**Authors:** Benavides Prada Omar Andrés, Hincapie Bisbicus Juliana, Sánchez Jaimes Mayra Jimena\*\*

**Keywords:** Biodigester, biogas, anaerobic digestion, biodegradable organic waste.

**Description:**

This research proposes a conceptual design to generate electricity from organic waste from the Guarín market square (Bucaramanga, Santander). Raw material availability, biogas potential, and technical and economic viability were evaluated through a pre-feasibility study. A monthly generation of 39.17 tons of waste, composed primarily of peels and vegetables, was identified, with an estimated potential of 99.54 m<sup>3</sup> of biogas per day, equivalent to 196.45 kWh/day, sufficient to partially cover the administration's electricity demand (2,039 kWh/month).

Economically, the project showed a positive NPV, an IRR of 42% (compared to a discount rate of 8%), and a return on investment in less than three years, confirming its profitability. Thus, the energy recovery of organic waste is presented as a technically and financially viable alternative that contributes to the local energy transition and improves solid waste management.

\* Bachelor Thesis.

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Omar Andrés Benavides.

## Introducción

Actualmente, la demanda energética mundial es satisfecha, en su mayoría, por una serie de combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas natural, las cuales generan contaminación atmosférica en niveles importantes, resultando crucial diversificar las fuentes de energía utilizadas (García Rodríguez & Gómez Franco, 2016). El acuerdo de París, dictado el 12 de diciembre de 2015, ha contribuido en gran manera a promover la conciencia alrededor de la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, que son consecuencia del aumento exponencial de los residuos generados por la producción global, lo que resalta la necesidad de una transición a energías renovables (Pinedo López et al., 2024).

Según el Ministerio Colombiano de Minas y Energía, “se consideran fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) la biomasa, las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), la energía eólica, la energía geotérmica, la energía solar, los mares, el hidrógeno verde y el hidrógeno azul”. En el caso de la biomasa, esta se puede utilizar en la producción de bioenergía y, en los últimos años, su uso ha comenzado a expandirse como una alternativa viable ante las emisiones de contaminantes al emplear diversas fuentes, como los residuos del sector agrícola, los cuales se generan en las plazas de mercado de todo el país (García Rodríguez & Gómez Franco, 2016).

En este contexto, la biomasa juega un papel fundamental en la producción de biogás mediante digestión anaerobia (DA) de materia orgánica gracias a un consorcio de microorganismos en ausencia de oxígeno. Este proceso permite aprovechar subproductos agrícolas y residuos municipales con un menor impacto ambiental, en comparación con otras estrategias basadas en combustión (Rios & Kaltschmitt, 2016), lo que ha atraído la atención mundial al facilitar un suministro sostenible de energía renovable.

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

En concordancia con lo anterior, este trabajo propone un análisis teórico enfocado en el diseño conceptual de un sistema de generación eléctrica a partir de residuos orgánicos generados en la plaza de mercado Guarín, ubicada en Bucaramanga, Santander. La ruta metodológica inició con la realización de una encuesta aplicada a los trabajadores de la plaza, con el fin de organizar un inventario sobre la oferta, cantidad y el tipo de residuos orgánicos que se encuentran disponibles. Luego se procedió a la caracterización teórica de dichos residuos, basada en una revisión bibliográfica de sus propiedades fisicoquímicas y biológicas para determinar el potencial de biomasa aprovechable. Posteriormente, se aplicaron modelos matemáticos para estimar la producción de biogás y seleccionar la alternativa más adecuada para el diseño, considerando aspectos como el tipo de reactor, el sistema de almacenamiento de biogás y el generador eléctrico, así como la identificación de posibles impactos ambientales ante su implementación. Finalmente, se realizó un estudio de prefactibilidad económica mediante el cálculo de diversos indicadores financieros, determinando la viabilidad de implementación del diseño a proponer, el cual busca contribuir con la autosuficiencia energética y promover la gestión sostenible de residuos orgánicos, diversificando la matriz energética local.

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

### 1. Objetivos

#### 1.1. Objetivo general

Proponer un diseño conceptual de un sistema de generación sostenible de energía eléctrica a partir de residuos orgánicos, disponibles en la plaza de mercado Guarín en Bucaramanga, Santander.

#### 1.2. Objetivos específicos

- Determinar la cantidad de residuos orgánicos disponibles y la demanda energética en la plaza de mercado de Guarín.
- Estimar el potencial de producción de biogás a partir de los residuos orgánicos disponibles y la cantidad de energía eléctrica resultante.
- Analizar la viabilidad económica del proyecto mediante un estudio de prefactibilidad.

## 2. Marco conceptual

### 2.1. Residuos orgánicos biodegradables

Según la Agencia Presidencial de Cooperación Internacional de Colombia, (2015), los residuos orgánicos biodegradables son aquellos que tienen la característica de poder desintegrarse o degradarse rápidamente, transformándose en otro tipo de materia orgánica. En otras palabras, se trata de alimentos o productos que son descartados de forma consciente; por ejemplo, una fruta en descomposición. Estos residuos también pueden estar asociados a pérdidas, entendidas como la disminución en la disponibilidad de alimentos a causa de ineficiencias en la cadena de suministro (García González & Pérez Herrera, 2024).

### 2.2. Biogás

El biogás es un producto generado a partir de la DA de biomasa, y se compone principalmente por metano, dióxido de carbono y, en menores proporciones, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno y amoníaco. Su capacidad energética está directamente relacionada con el contenido de metano, ya que este compuesto determina la calidad del gas. La proporción de este compuesto en el biogás puede oscilar entre 55 y 80 %, dependiendo del tipo de biomasa utilizada, las condiciones del sistema de digestión anaerobia y factores operativos como la temperatura (García González & Pérez Herrera, 2024). El biogás tiene una densidad aproximada de 1,133 kg/m<sup>3</sup> y un poder calorífico medio de 22 MJ/m<sup>3</sup>. Su obtención puede darse de forma natural o mediante sistemas controlados conocidos como biodigestores y, gracias a sus características energéticas, representa una alternativa viable para sustituir fuentes tradicionales como el gas propano o el diésel (León Torres et al., 2019).

### 2.3. Digestión anaeróbica

La digestión anaerobia es la degradación de la biomasa debido a un grupo de microorganismos en ausencia de oxígeno mediante un proceso biológico natural, generando

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

diferentes subproductos como el biogás, junto con un efluente o digestato estabilizado (García González & Pérez Herrera, 2024). Este proceso se compone de cuatro etapas metabólicas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. La realización de dichas etapas es posible gracias a la actuación conjunta de varios grupos fisiológicos de microorganismos, lo que permite la degradación y transformación de sustancias de elevado peso molecular (como polisacáridos, proteínas y grasas) en dióxido de carbono y metano, cuya pureza dependerá del sustrato empleado y de los parámetros operacionales y ambientales sucedidos durante el proceso. De manera más específica, el metano se genera durante la metanogénesis a partir de precursores como el hidrógeno y el dióxido de carbono (metanogénesis hidrógeno trófica) o el ácido acético (metanogénesis acetoclástica), los cuales son el resultado de las actividades de los fermentadores anaerobios (Lorente, 2019).

### **2.4. Biodigestor**

Un biodigestor es un recipiente cerrado y hermético en el que se introduce materia orgánica diluida en agua, con el propósito de someterla a un proceso de digestión anaerobia. (Carvalho & Casas Cirión, 2022). Los biodigestores pueden construirse a partir de materiales diversos como plástico, ladrillo, metal o cemento, y adoptar formas variadas, tales como cilíndrica o esférica. Su diseño incluye una entrada donde se carga la biomasa, que puede provenir de fuentes como estiércol animal o humano, aguas residuales, residuos de mataderos o residuos sólidos urbanos, y una salida que permite la evacuación del material ya tratado por la acción bacteriana (Herrera Folleco & Mondragón Romero, 2024).

### 3. Estado del arte

Un estudio previo analizó los residuos orgánicos recolectados en una plaza de mercado ubicada en Palmira, Valle del Cauca, encontrando que, con una producción de 2400 toneladas/año de residuos de frutas y verduras, se obtendrían alrededor de 3,155 MWh de energía eléctrica mediante digestión anaerobia. Por otro lado, en el caso de residuos de poda se reporta una producción de aproximadamente 217 toneladas/año, con los que se proyecta generar 140 MWh de energía eléctrica. El trabajo concluye que, si se aprovechara todo el biogás para producir energía eléctrica, el municipio podría emplearla para iluminación pública, combustible vehicular o como combustible para cocinas en las zonas rurales (Cadavid Rodríguez & Kaltschmitt, 2016).

Por otra parte, la producción de biogás mediante digestión anaerobia, a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá, fue valorada en el año 2016. Se seleccionaron residuos que presentaron un porcentaje mayor de macro y micronutrientes, a partir de los cuales formularon tres mezclas: una para vegetales, otra para frutas, y la mezcla control con estiércol y agua. A partir del proceso de biodigestión se obtuvieron porcentajes favorecedores de biogás que contenían, para la mezcla de vegetales, 69,5 % de metano; 67,7 % para la mezcla de frutas; y 64,1 % para la mezcla control. Por medio de un análisis estadístico (ANOVA) se concluyó que el mejor sustrato para implementarse en la producción de biogás es la mezcla compuesta por vegetales, ya que, además de un mayor porcentaje de metano, demostró condiciones adecuadas durante todo el proceso en cuanto al comportamiento del pH y temperatura (García Rodríguez & Gómez Franco, 2016).

También se ha investigado la producción de biogás a partir de residuos orgánicos recolectados en mercados, con el objetivo de caracterizar la composición de dichos residuos y evaluar su potencial para la digestión anaerobia en reactores por lotes. Para ello, se recolectaron

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

principalmente frutas y verduras, cuya composición se analizó en términos de carbohidratos, humedad y sólidos volátiles. Los resultados cuantitativos mostraron una producción bruta de biogás de 913,28 NmL por cada 100 g de residuo vegetal, con un contenido de metano del 31,68 % (289,33 NmL). Los autores concluyeron que los residuos de mercados representan una biomasa viable para la producción de biogás, resaltando la importancia de su caracterización para optimizar el proceso de obtención del combustible (Morales Polo et al., 2019).

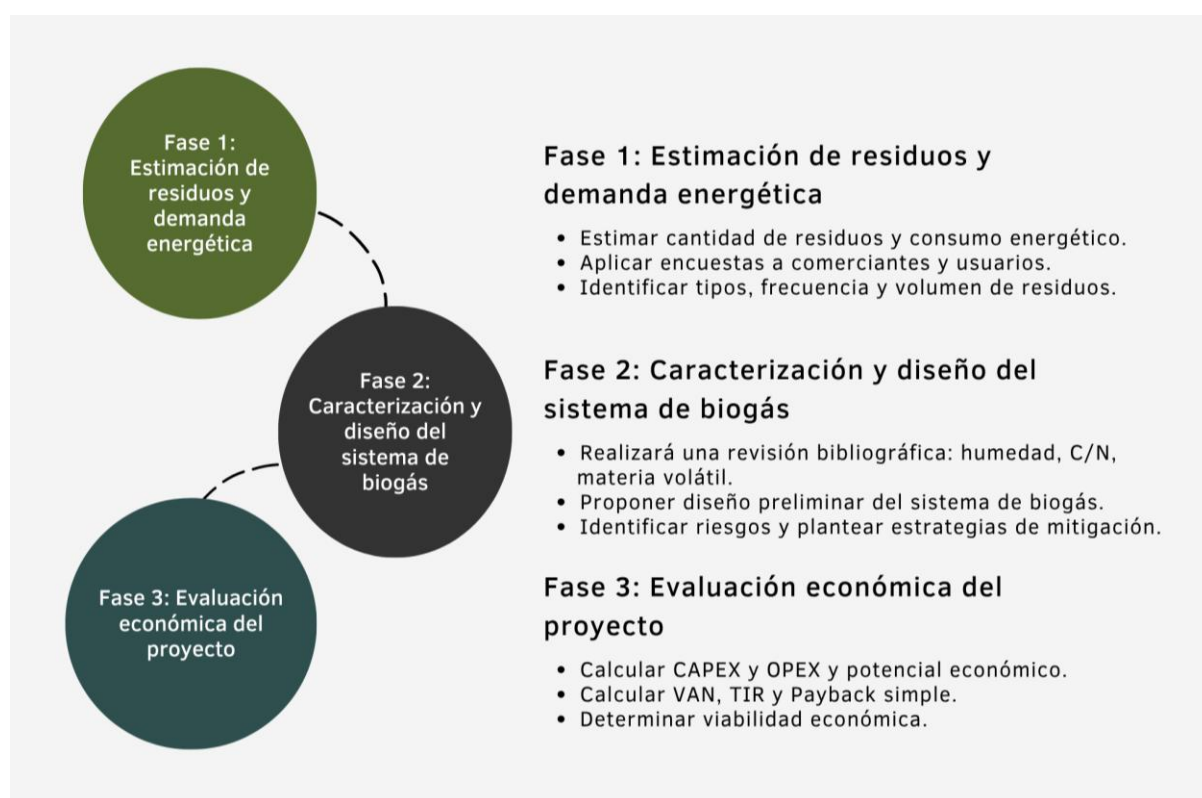
Finalmente, para el caso de la Central de Abasto de Ecatepec, Estado de México, se estimó el potencial energético de los residuos sólidos orgánicos generados mediante digestión anaerobia en un biorreactor de tanque semicontinuo. A partir de encuestas aplicadas a 85 locatarios, se identificó una producción diaria de, aproximadamente, 18 toneladas de residuos, de los cuales un 44 % correspondía a orgánicos. El estudio aplicó un modelo matemático adaptado a las condiciones locales para calcular la producción de metano. Bajo condiciones óptimas (20 % de sólidos totales, 55 °C de temperatura y un tiempo de retención hidráulico de 15 días), se estimó una generación diaria de 2.044,52 m<sup>3</sup> de biogás, de los cuales se podrían recuperar 1.227 m<sup>3</sup> de metano, equivalentes a una producción energética de 517,67 kWh/día. Este valor representa, aproximadamente, el 22 % de la demanda energética de la central. Los autores concluyen que, aunque la energía generada no cubriría la demanda total del recinto, representa un aporte significativo al aprovechamiento de energías limpias. Además, el proceso permitiría la obtención de subproductos como fertilizantes orgánicos (Martínez Rodríguez et al., 2023).

#### 4. Metodología

La Figura 1 presenta la ruta metodológica que se siguió en el desarrollo de este trabajo, estructurada en tres etapas que responden directamente a los objetivos específicos de la presente investigación.

**Figura 1.**

*Diagrama metodológico*



**Fase 1.** Esta etapa tuvo como finalidad estimar tanto la cantidad de residuos orgánicos disponibles en la plaza de mercado Guarín como su demanda energética actual. Para ello se diseñaron encuestas y reuniones para la recolección de información, las cuales se aplicaron a comerciantes, usuarios y personal administrativo del mercado. Se recopilieron datos sobre el tipo, frecuencia y volumen de residuos orgánicos generados, además de los patrones de consumo energético presentes en el lugar. Esta información permitió cuantificar la

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

disponibilidad de biomasa como insumo del proceso y establecer una línea base de las necesidades energéticas que potencialmente podrían ser suplidas mediante la generación de biogás.

**Fase 2.** Se procedió a la caracterización teórica de los residuos orgánicos basada en una revisión de literatura científica en contextos similares, considerando estudios de caso recientes. Esta caracterización incluyó variables como el contenido de humedad, la relación carbono/nitrógeno y el porcentaje de materia volátil, entre otros factores que inciden directamente en la eficiencia del proceso. Con base en lo anterior, se estimó el potencial de producción de biogás por medio de modelos teóricos validados, lo que permitió seleccionar una alternativa de diseño para el sistema de generación de electricidad. En esta etapa se definió el tipo de reactor a emplear, el sistema de almacenamiento del biogás y el generador eléctrico para la conversión a energía eléctrica, considerando las condiciones técnicas, operativas y económicas del entorno, y se identificaron los principales riesgos ambientales asociados al proceso.

**Fase 3.** Se evaluaron los recursos financieros necesarios para la iniciación y operación del proyecto (CAPEX y OPEX) mediante la revisión de costos de implementación y gestión de plantas de digestión anaeróbica, así como el cálculo del potencial económico de la producción de electricidad utilizando biogás. Adicionalmente, se calcularon indicadores financieros básicos como el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión (*payback* simple), con el fin de evaluar la viabilidad económica del proyecto.

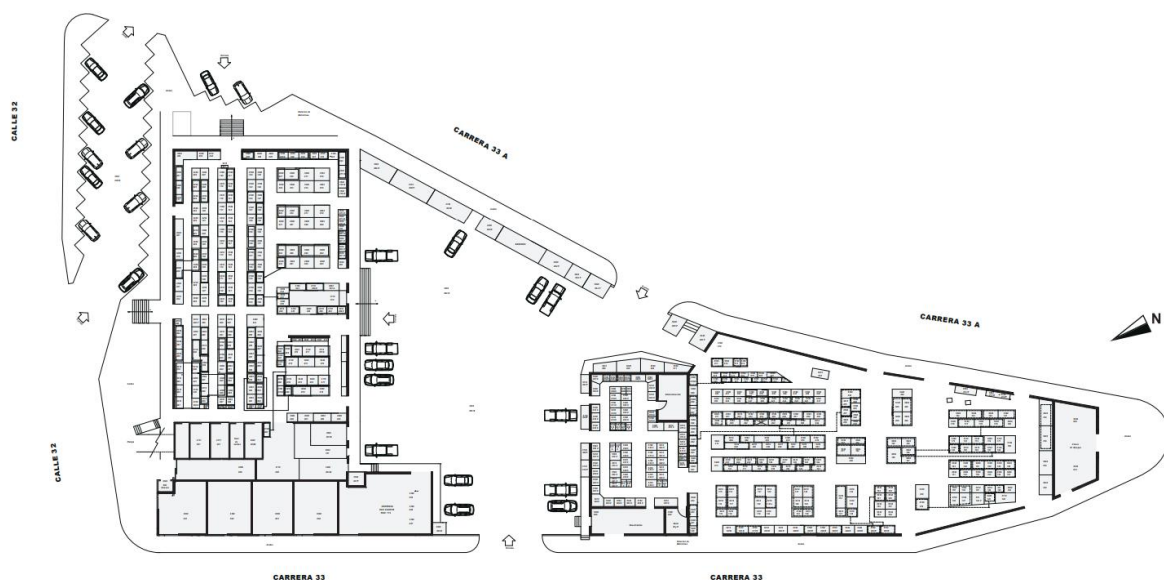
## 5. Resultados

### 5.1. Recopilación de información

La Figura 2 muestra el plano de la Plaza de Mercado Guarín, uno de los principales centros de comercio que se encuentran en la ciudad de Bucaramanga, en donde se alberga un aproximado de 350 negocios. De estos, se trabajó con una muestra de 45 puestos dentro de la plaza, entre los que se encuentran venta de frutas, verduras, hierbas aromáticas y jugos. Según datos proporcionados por la administración de la plaza, mensualmente se generan en promedio 39,17 toneladas de residuos orgánicos, que son separados del resto diariamente por los mismos trabajadores de cada puesto con el fin de ser entregados a la sección de aseo de la plaza y recolectados para su posterior despacho por medio de una empresa privada.

### Figura 2

*Plano de la Plaza de Mercado Guarín en Bucaramanga, Santander*



*Nota.* Suministrado por la administración encargada de la plaza de mercado Guarín.

Por otra parte, según información suministrada por la Electrificadora de Santander S.A E.S.P, el consumo energético actual por parte de la administración de la plaza de mercado

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Guarín (pasillos de la plaza, oficinas y alumbrado público) es, en promedio, de 2.039 kWh/mes, lo que representa un costo de \$ 1'889.756,59 pesos colombianos.

Para determinar el tamaño de la muestra para la recolección de la información, se identificaron inicialmente 82 puestos activos de frutas, verduras, hierbas aromáticas y jugos. Se consideraron únicamente los establecimientos que se encontraban en funcionamiento regular y operativo durante el periodo de estudio, aunque es importante señalar que este número puede presentar variaciones debido a la naturaleza dinámica de la actividad comercial en la plaza, pues algunos puestos adyacentes operan de manera integrada, constituyendo una sola unidad de generación de residuos. Mediante la fórmula con corrección por población finita se calculó el tamaño de muestra (Martínez Rodríguez *et al.*, 2023).

$$n = \frac{Z^2 p q N}{d^2 (N-1) + Z^2 p q} \quad (\text{Ec. 1})$$

Dónde,  $n$  es el tamaño de la muestra;  $N$  es la población total (82);  $Z$  el parámetro de distribución estándar para 95 % de confianza (1,96);  $p$  la probabilidad de éxito (0,5);  $q$  la probabilidad de error (0,5); y  $d$  el margen de error permitido (0,1). El cálculo arrojó que 45 encuestas garantizaban la representatividad estadística requerida. Los valores de las cantidades de residuos generados por cada puesto se encuentran en la Tabla A2 del apéndice A; estos datos fueron obtenidos directamente de los vendedores; en el siguiente enlace se puede consultar la encuesta aplicada: [ENCUESTA](#), cuyas respuestas pueden consultarse en: [RESULTADOS](#). La Tabla 1 presenta la distribución y composición de los residuos orgánicos generados diariamente en los 45 puestos encuestados.

Los resultados muestran que la mayor proporción de residuos orgánicos en la plaza de mercado Guarín corresponde a las cáscaras de fruta y verdura, con una participación casi equivalente: 33 y 35 % p/p, respectivamente. Los residuos de fruta en mal estado representan

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

un 25 % p/p del total, mientras que las verduras en mal estado y los residuos de hojas y tallos constituyen conjuntamente el 7 % p/p restante. Esta composición es determinante para la selección del modelo cinético más adecuado, pues cada tipo de residuo presenta propiedades fisicoquímicas distintas que inciden directamente en el potencial de generación de metano.

**Tabla 1**

*Distribución y composición porcentual de residuos orgánicos generados en la plaza*

<b>Tipo de residuo</b>	<b>Cantidad (kg/d)</b>	<b>Composición (% p/p)</b>
Fruta en mal estado	112,45	25
Verdura en mal estado	10	2
Cáscara de fruta	147,1	33
Cáscara de verdura	149,25	35
Hojas y/o tallos	21	5

## 5.2. Estimación de la producción de biogás

### 5.2.1. Selección de la alternativa de diseño

Para estimar el rendimiento energético de la biomasa se realizó una revisión bibliográfica de estudios con residuos vegetales similares (FVW), priorizando investigaciones en plazas de mercado de América Latina. La Tabla 2 presenta un resumen de lo reportado en la literatura, especificando el tipo de residuo evaluado y el método utilizado para determinar el potencial energético.

Se identificaron investigaciones que resaltan la relevancia del estiércol como co-sustrato en la digestión anaerobia de residuos de frutas y verduras (FVW). León Torres *et al.*, (2019) diseñaron e implementaron una planta piloto en Perú empleando estiércol animal junto con residuos orgánicos, optimizando tanto la calidad del biogás como la producción de biofertilizantes. De forma similar, Jiménez Lobo, (2018) evidenció que la adición de estiércol

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

a mezclas con residuos alimenticios y vegetales aumentaba significativamente el potencial bioquímico de metano (BMP) frente a la digestión de vegetales aislados, confirmando el papel estabilizador del estiércol sobre la relación carbono/nitrógeno. La investigación de García & Gómez, (2016) en la central de abastos de Bogotá constituye un referente aplicado al contexto colombiano, al evaluar la codigestión de diversas mezclas de FVW con estiércol bovino en biodigestores, obteniendo balances de masa y energía útiles para entornos urbanos. Por otro lado, Edwiges *et al.*, (2018) llevaron a cabo una evaluación sistemática de la digestión anaerobia en régimen semicontinuo de una mezcla diversa de FVW en un biodigestor con lodos provenientes de una PTAR. Este estudio demostró que la mayor eficiencia se alcanzaba con una carga orgánica (OLR) de 5,0 g SV L<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>, con un rendimiento de 360 LN CH<sub>4</sub>/kg SV equivalente al 79 % del BMP, advirtiendo que cargas mayores favorecían la acumulación de AGV y reducían la estabilidad del proceso.

**Tabla 2**

*Producción de biogás a partir de residuos vegetales en plazas de mercado o contextos similares.*

<b>Caso de estudio</b>	<b>Método de evaluación energética</b>	<b>Referencia</b>
Frutas + verduras vs. residuos de poda (Palmira, CO).	Experimento en batch (digestión anaerobia); análisis comparativo sin co-sustratos.	(Cadavid Rodríguez & Bolaños Valencia, 2015)
Frutas + verduras cocidas de una cafetería (Bogotá, CO).	Estudio de caracterización y viabilidad económica de un biodigestor a nivel institucional; sin modelo matemático específico, se basan en datos empíricos.	(Herrera Folleco & Mondragón Romero, 2024)
Frutas vs verduras de central de abasto, con ~10% estiércol (Bogotá, CO).	Experimento a escala piloto en plaza de mercado con digestores semicontinuos; medición de parámetros fisicoquímicos y balances de masa/energía.	(García Rodríguez & Gómez Franco, 2016)
Frutas, verduras y una mezcla en un mercado (ES).	Caracterización composicional y ensayos batch de potencial bioquímico de metano (BMP); ajuste a modelo de primer orden.	(Morales Polo <i>et al.</i> , 2019)

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

<b>Caso de estudio</b>	<b>Método de evaluación energética</b>	<b>Referencia</b>
Frutas + verduras de central de abasto (Ecatepec, MX).	Cálculo teórico-cuantitativo del potencial de biogás (método de digestión anaerobia); modelo matemático ajustado a condiciones locales.	(Martínez Rodríguez <i>et al.</i> , 2023)
Residuos orgánicos de plazas de mercado (CO).	Estudio de caracterización nacional (muestreo en plazas); modelos y fórmulas generales en anexos.	(Unidad de Planeación Minero Energética, 2011)
Fruta + verdura de plaza de mercado (Boyacá, CO).	Proyecto de diseño de prototipo de planta de biogás; incluye dimensionamiento del biodigestor.	(Sotaquira Medina, 2020)
Estiércol animal + residuos orgánicos (La Libertad, PE).	Diseño e implementación de planta piloto de biogás con desulfurización y producción de biofertilizantes.	(León Torres <i>et al.</i> , 2019)
Frutas de mercado mayorista (Lima, PE).	Tesis de pregrado para la evaluación de potencial energético de residuos de fruta. Trabajo de campo (encuestas a comerciantes) y análisis de muestra; cálculos teóricos de biogás y electricidad.	(Anchayhua Chate & Toribio Soca, 2020)
Frutas + verduras de la Plaza Trinidad Galán (Bogotá, CO).	Propuesta integral de bioenergía in situ; cálculo de potencial de CH <sub>4</sub> a partir de tonelajes de residuos y simulación de un sistema con cogeneración.	(Varela Bernal & López, 2022)
Frutas + verduras y co-digestión con otros residuos.	Artículo de revisión científico sobre procesos de digestión/co-digestión y ecología microbiana.	(García Peña <i>et al.</i> , 2011)
Residuos alimenticios + biomasa vegetal (Medellín, CO).	Tesis de maestría sobre experimentos de co-digestión con distintas proporciones de residuos de comida y vegetales; análisis de CH <sub>4</sub> en biogás y rendimientos BMP.	(Jiménez Lobo, 2018)
Frutas + verduras de central de abasto (Foz do Iguaçu, BR).	Artículo científico que evalúa el potencial metanogénico de residuos con etapa de arranque y rendimientos óptimos de biogás.	(Edwiges <i>et al.</i> , 2018)

De manera particular, el empleo de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) como inóculo de arranque en sistemas de digestión anaerobia constituye una alternativa ventajosa debido a su elevada diversidad microbiana, la cual favorece una rápida adaptación del consorcio a nuevos sustratos. Además, su disponibilidad

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

local y bajo costo los convierten en un recurso accesible para proyectos de bioenergía. Estos lodos presentan un contenido significativo de biomasa activa y una adecuada capacidad amortiguadora, lo que contribuye al control del pH durante la etapa inicial de acidificación, típica de los residuos de frutas y verduras. En consecuencia, su utilización permite reducir los tiempos de arranque y mitigar riesgos de inestabilidad operativa; no obstante, es necesario considerar que, en algunos casos, pueden contener contaminantes derivados de descargas industriales y presentar deficiencias en ciertos nutrientes, por lo que se recomienda su co-digestión con estiércol bovino u otros cosustratos que garanticen la estabilidad y eficiencia metanogénica a largo plazo (Edwiges *et al.*, 2028).

Por otra parte, la elección de las proporciones de alimentación en un digester anaerobio constituye un aspecto fundamental para garantizar la estabilidad del proceso y maximizar la producción de biogás. En este trabajo se definió una relación  $SV_{FVW} / SV_{inóculo} = 0,10$ , de acuerdo con la metodología propuesta por Edwiges *et al.*, (2018), junto con una relación 1:1 entre sustrato y agua (Vásquez, 2022). La primera decisión se sustentó en la necesidad de garantizar un arranque controlado en el que la biomasa inoculada tenga capacidad suficiente para adaptarse al nuevo sustrato. Los residuos de frutas y verduras de plazas de mercado presentan un contenido elevado de humedad (80 a 90 %) y carbohidratos fácilmente degradables, pero suelen caracterizarse por una relación C/N alta (mayor a 35) (UPME, 2011), lo que puede conducir a procesos de acidificación y acumulación de AGV cuando se digieren de manera aislada (Deublein & Steinhauser, 2011). Los lodos de PTAR resultan adecuados para evitar sobrecarga orgánica en la fase de arranque y facilitar la adaptación microbiana.

### ***5.2.2. Caracterización fisicoquímica del sustrato***

Para estimar el potencial de producción de biogás fue necesario recopilar algunos parámetros fisicoquímicos específicos para evaluar si la muestra es adecuada. Esta caracterización incluyó tres parámetros fundamentales: humedad, porcentaje de cenizas y pH,

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

ya que influyen directamente en la biodegradabilidad del sustrato y en la eficiencia del proceso de digestión anaerobia. La Tabla 3 presenta los valores teóricos encontrados para los alimentos presentes en la muestra de estudio.

**Tabla 3**

*Valores teóricos de cenizas, humedad y pH en residuos de frutas y verduras*

<b>Alimento en mal estado</b>	<b>Cenizas (g/100 g)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>pH</b>
Persea americana (aguacate)	1,58 <sup>1</sup>	73,2 <sup>1</sup>	6,43 <sup>2</sup>
Pisum sativum (arveja)	0,90 <sup>1</sup>	78 <sup>1</sup>	6,5 <sup>2</sup>
Musa acuminata (banano)	0,67 <sup>1</sup>	78,3 <sup>1</sup>	5,15 <sup>2</sup>
Brassica oleracea var. italica (brócoli)	0,83 <sup>1</sup>	90,0 <sup>1</sup>	6,40 <sup>3</sup>
Allium cepa (cebolla morada)	0,43 <sup>1</sup>	88,6 <sup>1</sup>	5,50 <sup>2</sup>
Allium fistulosum (cebolla larga)	0,41 <sup>1</sup>	90,1 <sup>1</sup>	5,46 <sup>2</sup>
Prunus domestica (ciruela)	0,74 <sup>1</sup>	84,9 <sup>1</sup>	3,95 <sup>2</sup>
Fragaria × ananassa (fresa)	0,34 <sup>1</sup>	90,8 <sup>1</sup>	3,45 <sup>2</sup>
Phaseolus vulgaris L. (fríjol rojo)	4,14 <sup>1</sup>	12,3 <sup>1</sup>	6,05 <sup>2</sup>
Psidium guajava (guayaba)	0,59 <sup>1</sup>	80,8 <sup>1</sup>	4,10 <sup>4</sup>
Phaseolus vulgaris L. (habichuela)	0,7 <sup>1</sup>	90 <sup>1</sup>	5,80 <sup>2</sup>
Solanum quitoense (lulo)	0,39 <sup>1</sup>	93,0 <sup>1</sup>	3,70 <sup>5</sup>
Zea mays (maíz)	1,20 <sup>1</sup>	10,4 <sup>1</sup>	6,60 <sup>2</sup>
Mangifera indica (mango)	0,44 <sup>1</sup>	80,8 <sup>1</sup>	5,90 <sup>2</sup>
Malus domestica (manzana)	0,43 <sup>1</sup>	83,6 <sup>1</sup>	3,65 <sup>2</sup>
Citrus × sinensis (naranja)	0,43 <sup>1</sup>	86,7 <sup>1</sup>	4,02 <sup>2</sup>
Solanum tuberosum (papa)	2,71 <sup>1</sup>	8,3 <sup>1</sup>	5,70 <sup>2</sup>
Carica papaya (papaya)	0,39 <sup>1</sup>	88,1 <sup>1</sup>	5,60 <sup>2</sup>
Ananas comosus (piña)	0,25 <sup>1</sup>	85,0 <sup>1</sup>	3,60 <sup>2</sup>
Musa × paradisiaca (plátano)	0,82 <sup>1</sup>	74,9 <sup>1</sup>	5,50 <sup>2</sup>
Citrullus lanatus (sandía)	0,25 <sup>1</sup>	91,4 <sup>1</sup>	5,39 <sup>2</sup>

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Solanum lycopersicum (tomate)	0,31 <sup>1</sup>	94,7 <sup>1</sup>	4,60 <sup>2</sup>
Physalis peruviana (uchuva)	0,49 <sup>1</sup>	87,9 <sup>1</sup>	2,95 <sup>2</sup>
Vitis vinifera (uva morada)	0,54 <sup>1</sup>	78,2 <sup>1</sup>	2,90 <sup>2</sup>
Manihot esculenta Crantz (yuca)	2,70 <sup>1</sup>	2,8 <sup>1</sup>	6,00 <sup>6</sup>
Daucus carota (zanahoria)	0,68 <sup>1</sup>	89,3 <sup>1</sup>	6,14 <sup>2</sup>

*Nota.* Adaptado de U.S. Department of Agriculture, (2025)<sup>1</sup>; PickYourOwn.org, (s.f.)<sup>2</sup>; Zamora, E. (2016)<sup>3</sup>; Valera Montero *et al*, (2018)<sup>4</sup>; Morillo Coronado *et al*, (2019)<sup>5</sup> y International Potash Institute, (s.f.)<sup>6</sup>.

En línea con los márgenes sugeridos por la UPME, (2011) sobre la caracterización de la biomasa destinada a digestión anaerobia, los alimentos analizados en la Tabla 3 presentan contenidos de humedad elevados (en su mayoría, superiores al 80 %), lo que favorece una descomposición eficiente. Así mismo, se observan bajos contenidos de cenizas en cada uno de los alimentos en mal estado evaluados, lo que indica una escasa presencia de inertes y, por tanto, un mayor potencial energético disponible. De igual forma, las cáscaras de frutas y verduras tienen una participación significativa en la composición general del sustrato, representando el 68 % de la muestra total. Dado que estas cáscaras también son susceptibles a procesos de biodegradación, se optó por integrar todos estos componentes orgánicos en una mezcla homogénea. La decisión de considerar una codigestión que incluya tanto frutas y verduras en mal estado, como sus respectivas cáscaras, se fundamenta en los hallazgos de Muenmee *et al.*, (2021), quienes compararon el rendimiento de biogás en sistemas de digestión anaerobia utilizando residuos alimentarios completos frente a digestiones monosustrato de cáscaras, evidenciando que la codigestión no solo mejoró el rendimiento volumétrico de metano, sino que también redujo el tiempo de retención y estabilizó el proceso, debido a mayor disponibilidad de azúcares simples y carbohidratos en la pulpa, que compensan la baja biodegradabilidad de las cáscaras, ricas en lignina y compuestos estructurales resistentes.

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Respecto al pH, se calculó por medio de un promedio ponderado con los valores reportados en la Tabla 3, con un estimado de 4,71 para la muestra. Este valor es consistente con lo reportado por Edwiges *et al.*, (2018), quienes encontraron un pH inicial de 3,9 en la mezcla de frutas y verduras recolectada en la central de abastos de Foz do Iguaçu (Brasil). Esto demuestra que, pese a la diversidad de composiciones, los FVW tienden a presentar un medio ácido en estado fresco o en descomposición.

En la búsqueda de mejorar el rendimiento energético y la eficiencia del biodigestor, se deben excluir hojas y tallos presentes en la composición del sustrato, debido a que contienen altos niveles de lignina, lo que reduce la biodegradabilidad y disminuye la producción de metano (Sun *et al.*, 2024; Manyi Loh & Lues, 2023). Además, residuos como tallos y hojas de tomate contienen compuestos antimicrobianos (fenoles y alcaloides) que pueden llegar a inhibir la actividad metanogénica (Szilágyi *et al.*, 2021). Residuos con alta fracción orgánica fácilmente fermentable (pulpa y cáscaras de alimentos en mal estado) mejora la generación de biogás y se reduce la necesidad de pretratamientos complejos de la alimentación al biorreactor. Dicho esto, se dispone de 37,21 ton/mes de residuos orgánicos como sustrato.

### **5.2.3. Cálculos de producción de biogás**

Para el cálculo de la carga de ST se fijó un valor de 200 g ST/kg mezcla (equivalente al 20 % de sólidos totales dentro de la muestra), considerando una digestión anaerobia de alta concentración de sólidos también conocida como *high solids anaerobic digestion* (HSAD) (Zhao *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2018). Los sistemas HSAD se definen como aquellos que operan con contenidos de sólidos totales superiores al 15 %, típicamente en el rango de 20 a 40 % ST, lo que permite menor uso de agua, aumentar la tasa de carga orgánica, disminuir las pérdidas de nutrientes en el digestato y evitar o reducir su deshidratación (Zhuravleva *et al.*, 2024). La masa de sólidos totales que se introduciría en el reactor, con una alimentación fresca FVW de 1.240,38 kg/d, se calculó mediante la Ecuación 4 (248,08 kg/d).

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

$$Carga\ ST = Alimentación\ fresca * Relación\ ST \quad (Ec. 4)$$

Para determinar la fracción de sólidos orgánicos degradables se consideró que, según la UPME, (2011), los residuos orgánicos de plazas de mercado en Colombia poseen valores de sólidos volátiles (SV) entre 62,35 y 91,51 %. Esto depende del nivel de humedad de la biomasa y su composición de inertes que, como se evidenció en la Tabla 3, son acordes a un valor de SV elevado. Se decidió fijar el valor máximo del intervalo para SV, ya que proporciona la mayor cantidad de producción de biogás y asegura que el biodigestor tenga la capacidad suficiente para manejar variaciones en la composición de los residuos, garantizando que el sistema tenga la capacidad adecuada ante la máxima producción de biogás. De igual forma, se recomienda trabajar con un porcentaje de reducción de SV equivalente al 79,40 % para pruebas de digestión anaerobia en residuos vegetales. Con la Ecuación 5 se determinó la carga orgánica que se degradaría (227,01 kg SV/d).

$$SV_{FVW} = Carga\ ST * Relación\ SV \quad (Ec. 5)$$

Para la estimación del flujo de biogás se consideró un rendimiento de metano de 285  $LN\ CH_4/kg$  SV degradado (Edwiges *et al.*, 2018), adecuado para un inóculo de lodos provenientes de una PTAR en combinación con FVW. Con la Ecuación 6 se calculó el flujo volumétrico de metano (64,70  $m^3/d$ ).

$$Flujo\ volumétrico\ CH_4 = SV_{FVW} * Rendimiento\ biogás \quad (Ec. 6)$$

Según la FAO, (2011), el biogás es una mezcla gaseosa compuesta, principalmente, por metano, y su rango suele encontrarse entre el 40 y 70 % v/v, el cual varía según el tipo de materia orgánica utilizada y las condiciones del proceso. Edwiges *et al.*, (2018) reportan una fracción de metano del 65 % v/v en el biogás producido. Con base en este valor, aplicando la Ecuación 7 se estimó una producción de biogás de 99,54  $m^3/d$ .

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

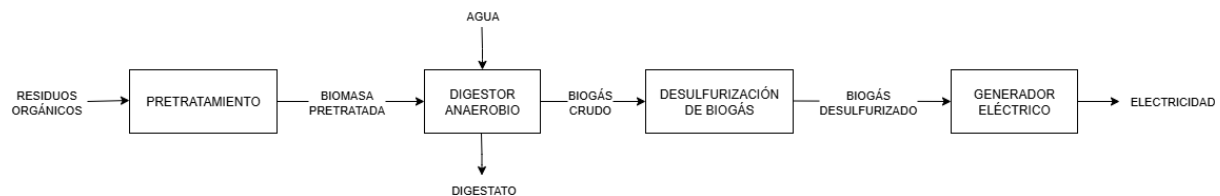
$$\text{Flujo volumétrico biogás} = \text{Flujo volumétrico } CH_4 * \frac{l}{\% CH_4 \text{ en el Biogás}} \quad (\text{Ec. 7})$$

### 5.3. Descripción general del proceso

En la Figura 3 se ilustra el diagrama de bloques del proceso (BFD). Se inicia con la recolección y una etapa de pretratamiento de la biomasa, donde los residuos son acondicionados para facilitar su biodegradación dentro del reactor. La biomasa pretratada se introduce en un digestor anaerobio, adicionando agua y lodo primario como inóculo en la etapa de arranque. En el digestor la materia orgánica se descompone en biogás y digestato, mientras el biogás producido se conduce a una desulfurización antes de ingresar al generador eléctrico para su conversión final en electricidad. El digestato es enviado a una etapa de postratamiento para aprovecharlo como subproducto de valor agrícola.

**Figura 3**

*Diagrama BFD del proceso de generación de electricidad mediante la producción de biogás*



#### 5.3.1. Pretratamiento químico

Cuando el pH de FVW es demasiado ácido puede ser corregido mediante procesos de alcalinización. Para evitar inhibiciones por acumulación de ácidos grasos volátiles dentro del digestor, se debe mantener la carga orgánica entre 2 y 4 g SV/L (Edwiges *et al.*, 2018). La literatura recomienda el uso de agentes alcalinos, como hidróxido de sodio o hidróxido de calcio (Parra Ortiz *et al.*, 2021); sin embargo, en el presente caso de estudio se obtuvo una carga orgánica de 4,08 g SV/ L, indicando que no sería necesario el pretratamiento químico.

#### 5.3.2. Pretratamiento térmico

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Se deben mantener las condiciones mesófilas (30 a 40 °C) durante todo el proceso de digestión anaerobia. Temperaturas por debajo de este rango reducen la velocidad de degradación y producción de biogás, mientras que temperaturas superiores pueden inhibir o causar la muerte de las bacterias metanogénicas (Paniagua, 2025). Por ende, el biodigestor debe incorporar estrategias de aislamiento térmico que garanticen la temperatura de operación (35 °C). Según las recomendaciones de la FAO, los tanques deben construirse semienterrados o contar con aislamiento térmico externo, reduciendo las pérdidas de calor durante los períodos invernales. Para el presente caso de estudio se propone aislamiento térmico del suelo.

### **5.3.3. Pretratamiento mecánico**

En la etapa de hidrólisis, que limita la digestión anaerobia de residuos particulados, las enzimas hidrolíticas deben adherirse a la superficie del material para degradar la matriz sólida y liberar compuestos solubles. Disminuir el tamaño de partícula incrementa el área superficial específica disponible, acelerando la velocidad global del proceso. Reducir el tamaño de partícula en un 58 % puede aumentar la solubilización del residuo del 28 al 40 % (Vian *et al.*, 2024); por ende, los residuos deben ser cortados en tamaños comprendidos entre 3 y 5 cm.

### **5.3.4. Selección del biorreactor**

Se han reportado diversas configuraciones de reactores anaerobios, desde sistemas continuos de mezcla completa (CSTR) hasta diseños más simples como biodigestores en *batch*. En la Tabla 4 se resumen los parámetros operativos típicos para diferentes tipos de biorreactores anaerobios a presión atmosférica. Los reactores discontinuos se caracterizan por su bajo costo de inversión y simplicidad, pero presentan limitaciones en el control de parámetros y la estabilidad del proceso (Velmurugan & Ramanujam, 2011). Por el contrario, los reactores UASB, aunque muy eficientes en el tratamiento de efluentes líquidos con altas OLR, muestran dificultades al digerir residuos sólidos heterogéneos, como los de plazas de mercado, debido a la necesidad de pretratamientos intensivos (separación de la fase sólida)

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

para evitar sedimentación y obstrucciones en el lecho de lodos (Kalogiannis & Komilis, 2024).

Aunque los reactores de tipo CSTR ofrecen una operación estable y un control uniforme de los parámetros operativos (Redalyc, 2021), el hecho de que demanden una agitación continua y mayor consumo energético dificulta su operación a mayor escala.

**Tabla 4**

*Biorreactores anaerobios para la producción de biogás a presión atmosférica.*

Tipo de reactor	Etapas	Temperatura (°C)	%CH <sub>4</sub> en biogás	TRH típico (d)	OLR típico	Referencia
Discontinuo ( <i>batch</i> )	1 (una sola)	Mesófilo 25–35 ó termófilo 55	50–65	30–60 (mesófilo) ó 5–15 (termófilo)	N/A (carga única inicial)	(Velmurugan & Ramanujam, 2011)
Mezcla completa (CSTR)	1 (continua)	Mesófilo 35 ó termófilo 55	50–65	20–30 (mesófilo) ó 12–20 (termófilo)	3–6 kg SV/m <sup>3</sup> ·d	(Redalyc, 2021)
Flujo ascendente (UASB)	1 (continua)	Mesófilo 30	60–70 (típico) ó hasta 85 (óptimo)	0,5–1	5–10 kg COD/m <sup>3</sup> ·d	(Redalyc, 2021)
Flujo pistón (tubular)	1 (continua)	Mesófilo 20–35	55–65	20–40	3–5 kg SV/m <sup>3</sup> ·d	(Huang <i>et al.</i> , 2024)
LBR + UASB	2	Mesófilo 35 °ó etapa 1 termófilo 55	70–75 (en la 2 <sup>a</sup> etapa)	5–10 (sólidos) + 0,5–5 (líquidos)	5–15 kg SV/m <sup>3</sup> ·d (global)	(Kalogiannis & Komilis, 2024)

Los reactores tubulares de flujo pistón (PFR) han demostrado ser adecuados para residuos con alta fracción de sólidos como los generados en plazas de mercado. Se reporta un TRH de 20 a 40 días y una OLR entre 3 y 5 kg SV/m<sup>3</sup>·d, con fracciones de metano en el biogás del 55–65 %, garantizando estabilidad y buen rendimiento (Bouallagui *et al.*, 2005; Huang *et al.*, 2024). A escala industrial, se han operado PFR mesofílicos con OFMSW (fracción orgánica

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

de residuos sólidos municipales) a un TRH de 22 días y una OLR de hasta 10 kg SV/m<sup>3</sup>·d (Le Pera *et al.*, 2021).


En este contexto, se propone emplear un reactor tubular de flujo pistón, mesofílico, operado de manera continua con un TRH promedio de 30 días, y como inóculo se recomienda lodo digerido de la PTAR para favorecer la adaptación microbiana en residuos de mercado (Arhoun *et al.*, 2019). Así mismo, aunque el reactor trabaja en régimen continuo, durante la etapa de arranque su operación es en modo discontinuo, pues facilita la adaptación de los microorganismos dentro del digester y la estabilización de parámetros como el pH y la alcalinidad, mientras que la OLR se incrementa de manera gradual hasta alcanzar el valor objetivo, evitando fenómenos de acidificación (Edwiges *et al.*, 2018). En el arranque se debe aplicar una estrategia de alimentación progresiva, con el fin de garantizar la adaptación de la biomasa metanogénica y la estabilidad del sistema. Se propone utilizar una OLR de 0,5 gVS L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> durante los primeros 20 días, manteniendo un TRH de 40 días. Posteriormente, el TRH se debe reducir a 30 días e incrementar la OLR de manera progresiva (de 0,5 hasta 4,0 gVS L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>), con un aumento de 0,1 gVS L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> cada cinco días.

### 5.3.5. Selección del generador eléctrico




En la Tabla 5 se muestran las diferentes opciones tecnológicas para la conversión de biogás a energía eléctrica.

**Tabla 5**

*Tecnologías disponibles para la generación de electricidad a partir de biogás*

Tecnología	Referencia	Eficiencia (%)	Mantenimiento típico	Costo	Vida útil (años)
Motor de combustión interna (gas)		30–35 <sup>1</sup>	Cambio aceite/filtros cada ~250–500 h <sup>2</sup>	~2.000 USD <sup>1</sup>	20–25 (con buen mantenimiento) <sup>3</sup>

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Turbina de gas (micro)		25–30 <sup>1</sup>	Muy largo (revisión mayor cada 100–150·10 <sup>3</sup> ) <sup>2</sup>	Alta inversión inicial <sup>2</sup>	20 (depende de las horas totales) <sup>3</sup>
Ciclo Orgánico de Rankine (ORC)		18–20 <sup>1</sup>	Mantenimiento medio <sup>2</sup>	Alta inversión inicial <sup>2</sup>	15–20 <sup>3</sup>
Pila de combustible (H <sub>2</sub> )		40–50 <sup>1</sup>	Complejo <sup>2</sup>	Muy elevado <sup>2</sup>	5–10 (dependiendo del tipo de celda) <sup>3</sup>

*Nota.* Adaptado de Cruz Ruiz *et al.* (2021)<sup>1</sup>, Energía estratégica (2020)<sup>2</sup>, Caterpillar (s.f.)<sup>3</sup> & Alibaba (s.f.)<sup>4</sup>.

Por lo general, se utilizan motores de combustión interna adaptados para biogás debido a su elevada eficiencia eléctrica, bajo costo en comparación con turbinas, y la flexibilidad de añadir o retirar unidades según la demanda energética de la planta y la disponibilidad de sustrato; además, han demostrado resultados sólidos a escala (INNIO, 2024).

### 5.3.6. Disposición final de los subproductos

El digestato puede constituir un recurso de valor como lodo higienizado, pues puede emplearse como fertilizante orgánico de alta calidad (Díaz, 2023). Según Seswoya *et al.*, (2025), el digestato de residuos de frutas y verduras contiene, aproximadamente, un 5,4 % de N<sub>2</sub> y altos niveles de fósforo y potasio; estos nutrientes lo hacen adecuado para reemplazar fertilizantes sintéticos, además de evitar la acumulación de lodos en vertederos (EPA, 2025).

## 5.4. Dimensionamiento teórico de equipos

### 5.4.1. Dimensionamiento teórico del biorreactor

La bibliografía indica que los lodos primarios espesados presentan sólidos totales entre 2 y 5 % ST, y una fracción volátil típica del 60 al 70 % SV, lo que se traduce en concentraciones

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

de sólidos volátiles (SV) operativas entre 12 y 35 g SV/L (Iowa State University, s.f.). Se aplicó la relación establecida en la Ecuación 9 (Edwiges *et al.*, 2018); con una concentración del lodo primario de 35 g SV/L, el volumen de lodo ( $V_L$ ) necesario es 64,86 m<sup>3</sup>.

$$SV_{inóculo} = \frac{SV_{FVW}}{0,10} \quad (\text{Ec. 9})$$

De acuerdo con la metodología propuesta por Vásquez, (2020), el volumen del reactor se determinó empleando el caudal de alimentación (Q) y el TRH. Para una alimentación de FVW de 1.240,38 kg/d, con una densidad de 310 kg/m<sup>3</sup> (Varela & López, 2022), se tiene un caudal de FVW de 4 m<sup>3</sup>/d. Para estimar el volumen de agua (1,24 m<sup>3</sup>/d), en relación másica 1:1, se utilizó su densidad (997,62 kg/m<sup>3</sup>) a 23 °C, temperatura promedio de Bucaramanga (IDEAM, 2025). El TRH equivale a 30 días para digestores de una etapa bajo condiciones mesofílicas (Pham Van *et al.*, 2019; Almeida *et al.*, 2024). Aplicando la Ecuación 10, el volumen estimado del reactor ( $V_R$ ) es de 222,20 m<sup>3</sup>.

$$V_R = Q * TRH + V_L \quad (\text{Ec. 10})$$

La velocidad de carga orgánica (OLR) se determinó mediante la aplicación de la Ecuación 11, considerando una concentración de sólidos volátiles (CSV) de 173 kg/m<sup>3</sup> (Thakur *et al.*, 2022). La OLR fue de 4,08 kg SV/m<sup>3</sup>, valor aceptable para biodigestores continuos.

$$OLR = \frac{Q * CSV}{V_R} \quad (\text{Ec. 11})$$

El volumen destinado al almacenamiento del biogás ( $V_G$ ) resultó de 111,10 m<sup>3</sup> y se calculó con la Ecuación 12. Mediante la Ecuación 13 se encontró el volumen total ( $V_T$ ), que corresponde a 333,30 m<sup>3</sup>. Se consideró un 20 % como factor de seguridad (Bolívar Pimenta, 2017) para un volumen final 399,96 m<sup>3</sup>.



## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Se determinó un diámetro de 1,89 m y una longitud aproximada de 14,20 m para cada biodigestor. Estas dimensiones facilitarían la operación y la interconexión en el arreglo multireactor seleccionado, de acuerdo con lo sugerido por el proveedor (Comunicación personal, SISTEMA.bio, 25 de septiembre de 2025).

### **5.4.2. Dimensionamiento teórico del generador eléctrico**

De acuerdo con el flujo volumétrico de metano (64,70 m<sup>3</sup>/d), con un poder calorífico inferior (PCI) de 8.708,4 kcal/m<sup>3</sup> (Martínez Rodríguez *et al.*, 2023), la energía térmica total contenida es 563.427,06 kcal/d; esto implica una generación de 654,84 kWh/d. Dado que la eficiencia de un motor de combustión interna como generador eléctrico es del 30 %, aproximadamente (Cruz Ruiz *et al.*, 2021), la energía eléctrica real obtenida es de 196,45 kWh/d. En consecuencia, se obtuvo que la producción mensual alcanza los 5.893,59 kWh y, considerando que el costo por kWh para la Plaza de Mercado Guarín (véase el Anexo A1) es de \$ 926,81 pesos colombianos, se obtendría un ahorro de \$ 5'462.236,76 COP/mes.

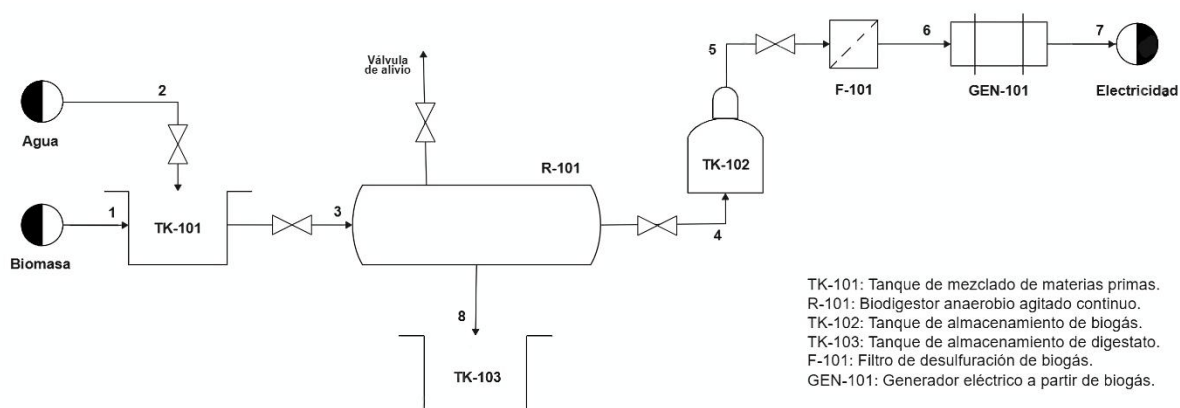
El biogás producido contiene, típicamente, H<sub>2</sub>S en concentraciones significativas (FAO, 2011). Esta concentración puede variar de 100 a 3000 ppm, dependiendo del tipo de residuo y de las condiciones operacionales. Para el residuo objeto del presente estudio, la concentración de H<sub>2</sub>S se encuentra entre 612 y 1500 ppm, con un valor medio de 1060 ppm (Kang *et al.*, 2010). Por lo tanto, el uso de biogás en motores de combustión interna requiere la remoción de H<sub>2</sub>S para asegurar concentraciones inferiores a 100 ppm, lo que hace necesario la implementación de un equipo de remoción de este contaminante. De acuerdo con la información proporcionada por el proveedor (*Weifang Power Machinery Equipment CO., Ltd*), se recomienda un generador eléctrico adaptado a biogás con una potencia de 30 kW y corriente trifásica. Siguiendo la recomendación del asesor técnico de la empresa, se cotizó un filtro para H<sub>2</sub>S que opera mediante adsorción: el sulfuro de hidrógeno reacciona con óxido de hierro para efectuar la desulfuración.

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La configuración final del sistema puede observarse en la Figura 5, donde se ilustra el PFD del proceso. Este diagrama sintetiza los resultados de la selección de las etapas y equipos, evidenciando cómo los residuos orgánicos de la Plaza de Mercado Guarín son transformados en biogás dentro del biodigestor tubular; el gas es purificado en el filtro de desulfurización y, finalmente, convertido en energía eléctrica a través del motor generador.

**Figura 5**

*Diagrama PFD del proceso de generación de electricidad mediante la producción de biogás*



### 5.5. Cálculo de CAPEX y OPEX

#### 5.5.1. Gastos de capital (CAPEX)

Se contemplaron los principales gastos de capital asociados al montaje de los equipos y a la logística de transporte.

**Tabla 6**

*Gastos de capital para el montaje del sistema de generación de electricidad a partir de biogás mediante DA de FVW en la Plaza de Mercado Guarín*

Concepto	Descripción	Costo anual [\$]	Proveedor
Sistema de biodigestión	10 unidades de 40 m <sup>3</sup> con instalación y revisiones técnicas semestrales	120'000.000,00	SISTEMA.bio

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Transporte del inóculo	64,86 m <sup>3</sup> de lodos	5'877.708,00	BAMOCOL
Generador eléctrico con sistema de purificación	Modelo WP30GFQ (30 kW / 38 kVA) con sistema de purificación de biogás	30'066.575,70	WEIFANG Ltd.
Transporte de generador eléctrico + filtro H <sub>2</sub> S	Transporte terrestre desde el puerto de Buenaventura hasta Bucaramanga	4'000.000,00	Ministerio de Transporte de Colombia
<b>Total CAPEX</b>		<b>159'944.283,70</b>	

En la Tabla 6 se detallan los rubros más relevantes de la inversión inicial, entre los que se incluyen la adquisición e instalación de biodigestores con mantenimiento semestral, el transporte del inóculo, la compra de un generador eléctrico con sistema de purificación de biogás, y el transporte del equipo desde el puerto de Buenaventura hasta Bucaramanga.

### 5.5.2. Costos operativos (OPEX)

Se consideran el requerimiento anual de agua y el mantenimiento del generador y del sistema de purificación (Tabla 7).

**Tabla 7**

*Costos operativos anuales asociados al montaje del sistema de generación de electricidad.*

Concepto	Base de cálculo	Costo anual [\$]	Referencia
Suministro de agua	Tarifa comercial + \$ 4.948,79/m <sup>3</sup>	2'445.917,32	(AMB Acto 062/2025, 2025)
Mantenimiento de equipos	3-5 % del valor del equipo/año	1'503.328,79	(WEIFANG LTD, 2025)
<b>Total OPEX</b>		<b>3'949.246,11</b>	

Según la literatura técnica, los generadores a gas requieren mantenimientos preventivos cada 500 horas de operación, que comprenden el cambio de aceite, filtros y revisión de bujías.

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Asimismo, cada 1.000 horas deben realizarse mantenimientos intermedios de calibración y sustitución de componentes menores, mientras que a las 10.000 horas es necesario un mantenimiento mayor con reemplazo de piezas críticas (WEIFANG LTD, 2025).

### 5.6. Análisis financiero

El horizonte de evaluación financiera se estableció en un periodo de diez años para la proyección del flujo de caja y la recuperación de la inversión (Polanía Beltrán *et al.*, 2023), tomando como ingresos el ahorro en el consumo de energía eléctrica. Se actualizaron los flujos de ingresos y egresos para que sean comparables en el tiempo (Molina Morejón *et al.*, 2020); para ello se adoptó una tasa de actualización nominal de 5,84 %, equivalente al promedio aproximado del índice de precios al consumidor (IPC) en Colombia durante los últimos diez años (estimado con la base en datos del DANE) y una tasa de descuento del 8 % (Polanía Beltrán *et al.*, 2023). Ambas tasas reflejan el crecimiento esperado de precios generales en el país y se emplearon para proyectar los flujos de caja al presente (Tabla 8).

**Tabla 8**

*Flujo de caja proyectado del sistema de generación de electricidad a partir de biogás*

Año	CAPEX [\$]	Ingresos [\$]	OPEX [\$]	Flujo de caja neto	Payback [\$]
0	-159'944.283,70	0	0	-159'944.283,70	-159'944.283,70
1		65'546.841,18	-3'949.246,10	61'597.595,07	-98'346.688,63
2		69'374.776,70	-4'179.882,08	65'194.894,63	-33'151.794,00
3		73'426.263,66	-4.423.987,19	69'002.276,47	35'850.482,48
4		77'714.357,46	-4'682.348,04	73'032.009,42	108'882.491,90
5		82'252.875,94	-4'955.797,17	77'297.078,77	186'179.570,66
6		87'056.443,89	-5'245.215,72	81'811.228,17	267'990.798,83
7		92'140.540,21	-5'551.536,32	86'589.003,89	354'579.802,73
8		97'521.547,76	-5'875.746,04	91'645.801,72	446'225.604,45

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

9	103'216.806,15	-6'218.889,61	96'997.916,54	543'223.520,99
10	109'244.667,63	-6'582.072,76	102'662.594,87	645'886.115,86

Se calcularon los indicadores financieros básicos presentados en la Tabla 9: el VAN mide el valor presente de los beneficios netos; la TIR corresponde a la rentabilidad porcentual interna del proyecto; y el Payback simple estima el tiempo requerido para recuperar la inversión inicial. Los criterios para aceptar un proyecto como viable es que el VAN sea mayor a cero y que la TIR sea mayor que la tasa de descuento (Baca, 2013; FAO, 2017). Ambos indicadores resultaron en los rangos de aceptación del proyecto y, de acuerdo con los flujos de caja proyectados, al tercer año el flujo acumulado se vuelve positivo con un superávit de \$ 35'850.482,48 pesos colombianos, lo que indica que el periodo de recuperación de la inversión (payback simple) ocurre entre el año 2 y el 3. Según estos resultados, el proyecto sería económicamente viable.

**Tabla 9**

*Indicadores financieros del sistema de generación de electricidad a partir de biogás*

<b>Indicador financiero</b>	<b>Valor del indicador</b>	<b>Decisión sobre el proyecto</b>
VAN	305'822.489,73	Se acepta
TIR	0,42	Se acepta

## 6. Limitaciones

El diseño conceptual se enfrenta a varias limitaciones que deben reconocerse. La primera corresponde a la restricción de espacio y acondicionamiento dentro de la plaza de mercado, lo cual condiciona la huella disponible para la instalación y disposición de los biodigestores. A esto se suma la variabilidad estacional en la generación de residuos de frutas y verduras, limitación que puede afectar diversos factores dentro del sistema, como la humedad, el pH, la carga orgánica y la estabilidad del proceso. Otra restricción importante es el riesgo de acidificación asociado a una OLR ligeramente elevada ( $4,08 \text{ kg SV/m}^3 \cdot \text{d}$ ), lo cual puede comprometer la fase metanogénica. Además, el modelo parte de supuestos de mezclado ideal y homogeneidad que, en la práctica, pueden no cumplirse, y se basa en parámetros cinéticos obtenidos de la literatura, lo que introduce variabilidad en las estimaciones. Finalmente, aspectos como la incertidumbre económica, los requisitos normativos y la aceptación social constituyen factores externos que deben ser considerados.

Aunque en Colombia existen incentivos tributarios relevantes para los proyectos de energías renovables, como la deducción del 50 % de la inversión en el impuesto sobre la renta, la exclusión del IVA y la depreciación acelerada de activos, surgen limitaciones que pueden frenar su aplicación (Ley 1715 de 2014; Decreto 895 de 2022). Una de las principales dificultades es la exigencia de certificación por parte de la UPME, lo que implica trámites administrativos extensos y posibles demoras que desincentivan los proyectos de pequeña escala (Universidad Externado de Colombia, 2020). Además, el beneficio tributario se encuentra limitado a un máximo del 50 % de la renta líquida y debe distribuirse en un plazo de hasta 15 años, lo que restringe su impacto en empresas con baja rentabilidad (Decreto 895 de 2022). Aunque los incentivos existen, las barreras administrativas, jurídicas y económicas reducen su efectividad, especialmente en proyectos locales o de menor escala como los que se proponen en esta investigación.

## 7. Conclusiones

Las encuestas realizadas permitieron determinar que en la Plaza de Mercado Guarín se generan mensualmente alrededor de 39,17 toneladas de residuos orgánicos, con predominio de cáscaras de frutas (33 % p/p) y verduras (35 % p/p), seguidas de frutas en mal estado (25 % p/p) y, en menor proporción, residuos de hojas, tallos y verduras deterioradas (7 % p/p). Esta caracterización cuantificó el recurso disponible y permitió la selección del modelo cinético debido a la información cualitativa de las propiedades fisicoquímicas que inciden en la producción y eficiencia de biogás. Asimismo, solo la administración de la plaza presenta una demanda energética promedio de 2.039 kWh/mes, lo que, al relacionarse con la disponibilidad de residuos orgánicos, demuestra la pertinencia de considerar su valorización energética.

Se estimó un potencial teórico de producción de biogás de, aproximadamente, 99,54 m<sup>3</sup>/d, lo que corresponde a una generación energética de 196,45 kWh/d. Este resultado indica la viabilidad técnica de los residuos orgánicos de la plaza como recurso energético renovable, y resalta su contribución potencial a la transición energética local hacia sistemas más sostenibles de gestión de residuos y producción eléctrica.

La evaluación financiera muestra que el proyecto sería económicamente viable. En primer lugar, el VAN positivo indica que, al descontar los flujos esperados, el proyecto crea valor neto y supera el umbral de rentabilidad requerido. Asimismo, la TIR (alrededor de 42 %) excede ampliamente la tasa de descuento considerada (8 %), significando que la rentabilidad del proyecto es superior al costo de capital o a la inflación esperada, garantizando un amplio margen de beneficio. Por último, el corto periodo de payback (antes de los tres años) evidencia que la inversión inicial se recupera en poco tiempo.

No obstante, es importante reconocer que la implementación del sistema presenta ciertas restricciones, principalmente asociadas a la disponibilidad continua de residuos

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

orgánicos, la logística de recolección y transporte, y los costos energéticos vinculados al pretratamiento. Estas limitaciones pueden afectar la estabilidad del suministro de materia prima y, en consecuencia, el desempeño económico a largo plazo. A ello se suma la falta de espacio físico en la Plaza de Mercado Guarán, cuya infraestructura limitada supone un desafío para la instalación del sistema y para la adecuada gestión logística y operativa de su funcionamiento.

## 8. Recomendaciones

Con base en las limitaciones identificadas, es fundamental implementar un control estricto del pH mediante monitoreo en línea y la dosificación de bases (NaOH, NaHCO<sub>3</sub> o KOH), acompañado de un protocolo de respuesta frente a episodios de acidificación según el pH registrado dentro del biodigestor. Se aconseja también iniciar la operación con una OLR baja y aumentar progresivamente la carga hasta alcanzar la condición de diseño (como se especificó en la etapa de arranque), de manera que se favorezca la adaptación de la biomasa.

Además de las recomendaciones técnicas planteadas, se sugiere considerar la escalabilidad y replicabilidad del sistema en otros mercados o plazas de abastos, así como asegurar el cumplimiento de normativas ambientales, sanitarias y energéticas vigentes. Por último, se resalta la importancia de articular el proyecto con estrategias de economía circular y mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, junto con la participación activa de la comunidad y los actores locales para garantizar la sostenibilidad a largo plazo.

Finalmente, se recomienda que en investigaciones futuras se sustituya la caracterización de tipo teórica por una caracterización experimental. Este enfoque permitirá obtener los parámetros fisicoquímicos reales de la muestra analizada, contribuyendo así a una comprensión más profunda y verificable del diseño estudiado. La aplicación de métodos experimentales posibilitará la validación directa de los resultados teóricos presentados en este trabajo y fortalecerá la confiabilidad de las conclusiones derivadas.

**Referencias bibliográficas**

- Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. (2025). *Acto 062 de 2025: Estructura tarifaria del servicio de acueducto (uso no residencial)*. AMB.
- Almeida, P. de S., Menezes, C. A., Cavalcante, W. A., Pinheiro, N. F., da Silva Júnior, F. C. G., Viana, M. B., & Leitão, R. C. (2024). Mesophilic anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: Single-versus two-stage reactor, and modeling of the liquid and solid fractions of the residue. *Industrial Biotechnology*, 20(5), 140–149. <https://doi.org/10.1089/ind.2024.0007>
- Anchayhua Chate, A. & Toribio Soca, T. (2020). Potencial energético de los residuos orgánicos generados en el Mercado Mayorista de Frutas N°2 (La Victoria, Lima) (Tesis de pregrado, Universidad San Ignacio de Loyola). *Repositorio Institucional USIL*.
- Agencia Presidencial de Cooperación Internacional de Colombia (APC-Colombia). (2015). Manual de gestión de los residuos o desechos peligrosos (Versión 3, Código A-OT-013). <https://www.apccolombia.gov.co/>
- Alibaba (s. f.). Batería de pila de combustible de hidrógeno. [Alibaba.com](https://spanish.alibaba.com/g/hydrogen-fuel-cell-stack.html). <https://spanish.alibaba.com/g/hydrogen-fuel-cell-stack.html>
- Appels, L., Lauwers, J., Degève, J., Helsen, L., Lievens, B., Willems, K., Van Impe, J., & Dewil, R. (2011). Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4295–4301. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.121>
- Arhoun, B., El Fels, L., El Hajjouji, H., & Hafidi, M. (2019). Anaerobic co-digestion of mixed sewage sludge and fruit and vegetable market waste: Composition and seasonality effect. *Journal of Water Process Engineering*, 31, 100848. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100848>

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

- Asís, H. G., Dopazo, F., & Gianoglio, P. J. (2012). Producción de energía a partir de biogás obtenido de residuos sólidos urbanos (Trabajo final). Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Francisco.
- Baca, U. G. 2013. Evaluación de proyectos. Séptima edición, McGraw Hill. México. 387 p.
- Bamocol S.A. (2025). Bamocol. <https://www.bamocol.com/>
- Bolívar Pimenta, H. M. (2017). Factibilidad de proyectos de inversión para plantas de biogás agroindustrial a pequeña escala usando como sustratos purines y chumberas [Opuntia ficus indica (L.) Miller] [Tesis doctoral, Universidad de Extremadura]. Dehesa.
- Bouallagui, H., Ben Cheikh, R., Marouani, L., & Hamdi, M. (2003). Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester. *Bioresource Technology*, 86(1), 85–89. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00159-9](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00159-9)
- Cadavid Rodríguez, L. S., & Bolaños Valencia, I. V. (2015). Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana. *Energética*, 23-28. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=147043932004>
- Cardona Alzate, C. A., Sánchez Toro, Ó. J., Ramírez Arango, J. A., & Alzate Ramírez, L. E. (2004). Biodegradación de residuos orgánicos de plazas de mercado. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 6(2), 78–89
- Carvalho, A. M., & Casas Cirión, L. E. (2022). Compostaje y biodigestores como solución al problema de los residuos orgánicos en el medio rural. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(4), 990–1005. <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/2641/3900>
- Caterpillar. (s. f.). *Grupos electrógenos de gas para biogás*. Caterpillar. <https://www.cat.com>
- Cruz Ruiz, L. M., Cáceres Castellanos, A., & Arias Henao, C. A. (2021). Methodology for the selection of an electric biogas generator for the use of Organic Solid Waste from

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

vegetable sources. *Visión electrónica*, 15(1), 133–141.

<https://doi.org/10.14483/22484728.17423>

Congreso de la República de Colombia. (2014, 13 de mayo). Ley 1715 de 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. *Diario Oficial* No. 49.150.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE. (2025). *Índice de Precios al Consumidor (IPC) – Año base 2018*. <https://www.dane.gov.co>

Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011). *Biogas from waste and renewable resources: An introduction* (2nd ed.). Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527632794>

Díaz, F. (2023, 31 de agosto). Biodigestión. Reciclo Orgánicos. Ministerio del Medio Ambiente, Chile. <https://reciclorganicos.mma.gob.cl/proyectos/biodigestion/>

European Biogas Association. (2024). Contribución de los digestatos a la salud del suelo [Informe]. AVEBIOM.

Edwiges, T., Frare, L. M., Alino, J. H. L., Triolo, J. M., Flotats, X., & Costa, M. S. S. M. (2018). Methane potential of fruit and vegetable waste: An evaluation of the semi-continuous anaerobic mono-digestion. *Environmental Technology*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1515262>

Energía Estratégica. (2020). Mantenimiento y vida útil de motores de biogás Jenbacher. Energía Estratégica. <https://www.energiaestrategica.com>

FAO. (2019). *Biogas: Experience and Perspectives in Latin America*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. 2017. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Guía para la formulación de proyectos de inversión del sector agropecuario Ministerio de Desarrollo Agropecuario. Ciudad de Panamá.

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

- García González, E. S., & Pérez Herrera, D. A. (2024). Evaluación a escala de laboratorio de la adición de biochar en la co-digestión anaerobia de residuos verdes y de alimentos para la producción de biogás. (Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander). Repositorio NOESIS. <https://noesis.uis.edu.co/items/2ce68600-9123-4a15-9653-b8a3d32f00ae>
- García Peña, E. I., Parameswaran, P., Kang, D. W., Canul Chan, M., & Krajmalnik Brown, R. (2011). Anaerobic digestion and co-digestion processes of vegetable and fruit residues: Process and microbial ecology. *Bioresource Technology*, 102(20), 9447-9455. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.068>
- García Rodríguez, A. M., & Gómez Franco, J. D. (2016). Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia. (Trabajo de grado, Fundación Universidad de América). <http://hdl.handle.net/20.500.11839/667>
- Green Empowerment. (2021). *Tubular biogas digester manual*. Green Empowerment.
- Hernández Hernández, H. A. (2012). Diseño de un biodigestor instrumentado electrónicamente para la generación de biogás en casa habitación. *Universidad Nacional Autónoma de México*
- Herrera Folleco, L., & Mondragón Romero, Y. (2024). Viabilidad económica de un biodigestor de acuerdo con la caracterización de los residuos orgánicos generados en la cafetería del bloque 15 en la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Bogotá D. C. (Trabajo de grado, Universidad Cooperativa de Colombia). <https://hdl.handle.net/20.500.12494/55623>
- Huang, W., Zhao, Z., Yuan, T., Huang, W., Lei, Z., & Zhang, Z. (2024). Recent advances in plug flow reactors for anaerobic digestion and in-depth evaluation of mixing approaches: A review. *Bioresource Technology*, 408, 131860.

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

International Potash Institute. (s. f.). Potassium Nutrition of Cassava (e-ific No. 34 – Research Findings). <https://www.ipipotash.org/publications/eifc-284>

Iowa State University. (s. f.). *Sludge disposal* [Lecture notes]. Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, Iowa State University. Recuperado de <https://home.engineering.iastate.edu/~leeuwen/CE%20523/Supplementary%20Notes/Sludge%20Disposal.doc>

IRENA. (2020). *Renewable Energy Market Analysis: Latin America*. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Renewable-Energy-Market-Analysis-Latin-America>

Jiménez Lobo, (2018). Producción y valorización energética de biogás, a partir de residuos alimenticios y biomasa vegetal (Tesis de pregrado, Instituto Tecnológico Metropolitano). *Repositorio Institucional ITM*.

Kang, J. W., Jeong, C. M., Kim, N. J., Kim, M. I., & Chang, H. N. (2010). On-site removal of H<sub>2</sub>S from biogas produced by food waste using an aerobic sludge biofilter for steam reforming processing. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 15(3), 505–511. <https://doi.org/10.1007/s12257-009-0134-8>

Kalogiannis, K. G., & Komilis, D. (2024). Biogas production from food and vegetable waste: Process parameters, reactor design, and scale-up perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 113872. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113872>

León Torres, C. A., Nomberto Rodríguez, C., Mendoza Avalos, G. A., Bardales Vásquez, C. B., Cabos Sánchez, J., & Barrena Gurbillón, M. A. (2019). Design and implementation of a biogas, biol and biosol production pilot plant. *Arnaldoa*, 26(3), 1017–1032. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26311>

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

- Le Pera, A., Sellaro, M., Migliori, M., Bianco, M., & Zanardi, G. (2021). Dry mesophilic anaerobic digestion of separately collected OFMSW: Two-year experience in an industrial-scale plug-flow plant. *Processes*, 9(2), 213. <https://doi.org/10.3390/pr9020213>
- Manyi Loh, C. E., & Lues, R. (2023). Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass: Substrate Characteristics (Challenge) and Innovation. *Fermentation*, 9(8), 755. <https://doi.org/10.3390/fermentation9080755>
- Marco Lorente, P. A. (2019). Digestión anaerobia de azúcares reductores para obtención de biocombustibles: Revisión bibliográfica. (Trabajo de fin de grado, Universidad de Valencia). *CORE*.
- Martínez Rodríguez, M. C., Campos Villegas, L. E., & Piña Garrido, B. (2023). Cálculo de la generación de biogás por el método de digestión anaerobia a partir de biomasa extraída de la central de abasto de Ecatepec, Estado de México. *Tecnología en Marcha*, 36(4), 68-75. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6106>
- Mata Alvarez, J., Dosta, J., Romero Güiza, M. S., Fonoll, X., Peces, M., & Astals, S. (2020). Anaerobic digestion (AD) of fruit and vegetable market waste (FVMW): Potential of FVMW, bioreactor performance, co-substrates, and pre-treatment techniques. *Applied Sciences*, 10(16), 5574. <https://doi.org/10.3390/app10165574>
- Ministerio de Hacienda y Crédito Público. (2022). Decreto 895 de 2022. Por el cual se reglamentan parcialmente los artículos 11, 12, 13 y 14 de la Ley 1715 de 2014. *Diario Oficial* No. 52.091.
- Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador. (2020). Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos municipales.
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (s.f). Fuentes no convencionales de energía renovable - FNCER.

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

- Ministerio de Transporte de Colombia. (2012). *Costos de referencia por tonelada para un tractocamión*. <https://share.google/1WTCui8LBTLct60mQ>
- Miramontes Martínez, L. R., Rivas García, P., Albalade Ramírez, A., Botello Álvarez, J. E., Escamilla Alvarado, C., Gomez Gonzalez, R., & Santos López, I. A. (2021). Anaerobic co-digestion of fruit and vegetable waste: Synergy and process stability analysis. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 71(5), 620–632. <https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1873206>
- Molina Morejón, V. M., Molina Romeo, V. P., Espinoza Arellano, J. J., Contreras Martínez, J. G., & López Villanueva, A. (2020). Viabilidad técnica y económica del uso de calentador comercial de agua a base de biogás en establos lecheros. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(2), 391–403.
- Morales Polo, C., Cledera Castro, M. d. M., & Moratilla Soria, B. Y. (2019). Biogas Production from Vegetable and Fruit Markets Waste—Compositional and Batch Characterizations. *Sustainability*, 11(23), 6790. <https://doi.org/10.3390/su11236790>
- Morejón Mesa, Yanoy, Moreno Melo, Vilma, & Mogollón Reina, Andrés. (2022). Dimensioning and Energy Potential of Biodigesters Installed in Productive Systems in the Department of Cundinamarca, Colombia. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 31(4).
- Morillo, A., Rodríguez, A., & Morillo, Y. (2019). Caracterización morfológica de lulo (*Solanum quitoense* Lam.) en el municipio de Pachavita, Boyacá. *Acta Biológica Colombiana*, 24(2), 291-298. <https://doi.org/10.15446/abc.v24n2.75832>
- Muenmee, S., Koottatep, T., & Thongmak, N. (2021). Comparison of anaerobic digestion performances between mixed food waste and peel waste in two-stage anaerobic digestion. *Environmental Research, Engineering and Management*, 77(1), 12–23. <https://doi.org/10.5755/j01.erem.77.1.25234>

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

- Muhayodin, F. (2020). A review on the fate of nutrients and enhancement of energy recovery from rice straw through anaerobic digestion. *Applied Sciences*, 10(6), Article 2047. <https://doi.org/10.3390/app10062047>
- Nordberg, Å., Jarvis, Å., Stenberg, B., Mathisen, B., & Svensson, B. H. (2007). Anaerobic digestion of alfalfa silage with recirculation of process liquid. *Bioresource Technology*, 98(1), 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.027>
- Olaya, Y., & González, H. (2009). Aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos mediante biodigestores [Informe técnico]. Universidad Nacional de Colombia.
- Paniagua, M. J. N. (2025). Construcción y diseño de un biodigestor tubular para el aprovechamiento energético a partir de residuos orgánicos aprovechables [Tubular biodigester construction and design for energy recovery from recoverable organic waste]. *Scienceevolution*, 4(2), 282–292. <https://doi.org/10.61325/ser.v4i2.201>
- Parra Ortiz, D. L., Botero Londoño, M. A., & Botero Londoño, J. M. (2021). Biomasa residual pecuaria: Revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos. *Revista UIS Ingenierías*, 20(4), 1–20. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/download/8343/9966?inline=1>
- PickYourOwn.org. (2025). pH of Foods and Food Products - Acidity / Alkalinity or Fruit, Vegetables and Foods to Help in Home Canning and Food Preservation.
- Pinedo López, J., Baena Navarro, R., Durán Rojas, N., Díaz Cogollo, L., & Farak Flórez, L. (2024). Energy transition in Colombia: An implementation proposal for SMEs. *Sustainability*, 16(17), 7263.
- Polanía Beltrán, D. C., Isaza Sánchez, F. A., & Pérez Ruiz, Y. A. (2023). Prefactibilidad de generación de electricidad y gas a partir de la digestión de la fracción orgánica de los

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

- residuos residenciales en el municipio de Simijaca [Tesis de maestría, Universidad del Rosario]. Repositorio Universidad del Rosario.
- Ramos Botello, Y. M., Bosch Cabrera, J. A., Arias Hidalgo, R. M., Santana Reyes, S. A., & Gutiérrez Toledo, D. R. (2022). Dimensionamiento de un biodigestor para el tratamiento de excretas de cerdos. *Revista Cubana de Ingeniería*, 13(1), e317.
- Redalyc. (2021). Producción de biogás a partir de residuos orgánicos: revisión y perspectivas. *Revista Redalyc de Energía y Medio Ambiente*, 15(2), 45–60.
- Rios, M., & Kaltschmitt, M. (2016). Electricity generation potential from biogas produced from organic waste in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 384-395.
- Sánchez Palomeque, F. R. (2019). *Evaluación de los residuos sólidos urbanos generados en tres parroquias del cantón Sucúa* [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18016>
- Seswoya, R., Rasit, N., Norazman, A. F., Mohd Hashim, S. A., Mohd Azman, N. A. F., & Muhammad Fauzi, S. N. S. (2025). Assessment of digestate from anaerobic digestion of fruit vegetable waste (FVW) as potential biofertilizer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1453(1), 012057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1453/1/012057>
- Sotaquira Medina, M. F. (2021). Diseño de un biodigestor para el aprovechamiento de la materia orgánica generada en la plaza de mercado del municipio de Sogamoso - Boyacá (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia). *Repositorio Institucional UNAD*.
- Sun, Z., Liu, Q., Li, Y., Mazarji, M., Feng, L., & Pan, J. (2024). Deciphering the impact of lignin on anaerobic digestion: Focus on inhibition mechanisms and methods for

alleviating inhibition. *ACS Omega*, 9(42), 44033-44041.

<https://doi.org/10.1021/acsomega.4c04375>

Szilágyi, Á., Bodor, A., Tolvai, N., Kovács, K. L., Bodai, L., Wirth, R., et al. (2021). A comparative analysis of biogas production from tomato biowaste in mesophilic batch and continuous anaerobic digestion systems. *PLoS ONE*, 16(3), e0248654.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248654>

Thakur, H., Dhar, A., & Powar, S. (2022). Biogas production from anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in continuously stirred tank reactor. Results in Engineering, 16, 100617. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100617>

Unidad de Planeación Minero Energética, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, & Universidad Industrial de Santander. (2011). Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Universidad Industrial de Santander.

Universidad Externado de Colombia. (2020). Incentivos tributarios para generación de energía a través de fuentes no convencionales en Colombia. *Revista de Derecho Fiscal*, (17), 145–170.

U.S. Department of Agriculture. (2025). *We are here for you* [Sitio web]. <https://www.usda.gov>

U.S. Environmental Protection Agency. (2024). Anaerobic digestion facilities processing food waste in the United States (2020 & 2021). EPA.

Varela Bernal, C. Y., López Martínez, G. A. (2022). Bioenergía a partir de biomasa residual en plazas de mercado de Bogotá. Estudio de caso: Plaza de Mercado Trinidad Galán. *Letras ConCiencia Tecnológica*, 19(1).

Valera Montero, L. L., Enríquez Nava, S., Silos Espino, H., Padilla Ramírez, J. S., Perales-Segovia, C., & Flores-Benítez, S. (2018). Propiedades fisicoquímicas de guayabilla (*Psidium guineense*), arrayán (*Psidium sartorianum*) y guayaba (*Psidium guajava*).

*Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(6), 1099-1108.

<https://doi.org/10.29312/remexca.v9i6.1576>

Vásquez Dávalos, S. E. (2020). Dimensionamiento de biodigestor a partir de la caracterización y análisis de residuos sólidos orgánicos de la cafetería CETYS Universidad [Tesis de maestría, Centro de Enseñanza Técnica y Superior]. CETYS Universidad.

Velmurugan, B., & Ramanujam, R. A. (2011). Anaerobic digestion of vegetable wastes for biogas production in a fed-batch reactor. *International Journal of Emerging Science and Engineering*, 1(3), 1–6. <https://doi.org/10.7763/IJES.2011.V1.25>

Vian, J., Velasco Pérez, A., Solar González, R., García Herrera, T., Puebla, H., & Vivar Vera, G. (2024). Particle Size Effect on Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Waste. *Fermentation*, 10(9), 485. <https://doi.org/10.3390/fermentation10090485>

Zamora, E. (2016). *El cultivo del brócoli* (Serie guías - producción de hortalizas DAG/HORT-010). Universidad de Sonora, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Departamento de Agricultura y Ganadería.

Zhao, X.-f., Yuan, Y.-q., Chen, Q.-k., Li, Q., Huang, Y., Wu, D., & Li, L. (2021). Effect of total solids contents on the performance of anaerobic digester treating food waste and kinetics evaluation. *E3S Web of Conferences*, 272, 01026. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127201026>

Zhuravleva, E. A., Shekhurdina, S. V., Laikova, A., Kotova, I. B., Loiko, N. G., Popova, N. M., Kriukov, E., Kovalev, A. A., Kovalev, D. A., Katraeva, I. V., Vivekanand, V., Awasthi, M. K., & Litti, Y. V. (2024). Enhanced thermophilic high-solids anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste with spatial separation from conductive materials in a single reactor volume. *Journal of Environmental Management*, 363, 121434. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121434>

SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Apéndices

Apéndice A (Residuos orgánicos disponibles y demanda energética)

A.1. Demanda energética de la Plaza de Mercado Guarín

Figura A1

Recibo del servicio de luz en el mes de mayo del año 2025 de la administración de la Plaza de Mercado Guarín



Nota. Suministrado por la administración encargada de la Plaza de Mercado Guarín.

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

## A.2. Clasificación y cuantificación de los residuos orgánicos

De acuerdo con las encuestas aplicadas, donde cada persona encuestada indicó el tipo de residuo que más genera en su puesto de trabajo, los residuos fueron clasificados según su categoría y cuantificados en función de la cantidad diaria producida. La Tabla A2 presenta un resumen de los tipos de residuos identificados y su respectiva cantidad diaria.

**Tabla A2**

*Clasificación y cuantificación de residuos orgánicos generados en la plaza*

No. de encuesta	Residuo	Tipo de residuo	Cantidad [kg/d]
1	Naranja en mal estado	Fruta en mal estado	2,5
2	Aguacate en mal estado	Fruta en mal estado	1,5
3	Tomate en mal estado	Fruta en mal estado	2,5
4	Manzana en mal estado	Fruta en mal estado	10
	Uva en mal estado		10
5	Flor de la manzanilla, hojas de laurel, hierbabuena, romero, etc	Hojas y/o tallos	2
6	Ciruela en mal estado	Fruta en mal estado	2
7	Flor de la manzanilla, hojas de laurel, hierbabuena, romero, etc	Hojas y/o tallos	3
8	Tusa y cáscara de mazorca	Cáscara de verdura	12,5
9	Cáscara de zanahoria	Cáscara de verdura	10
10	Cáscara de papa	Cáscara de verdura	2,5
	Tomate en mal estado	Fruta en mal estado	2,5
11	Cáscara de naranja	Cáscara de fruta	1,7
	Cáscara de papaya		1,7
	Cáscara de piña		1,7
12	Cáscara de piña	Cáscara de fruta	5
	Cáscara de papaya		5
	Cáscara de manzana		5
13	Cáscara de yuca	Cáscara de verdura	1
14	Aguacate en mal estado	Fruta en mal estado	0,4
	Banano en mal estado	Fruta en mal estado	0,4
15	Uchuva en mal estado	Fruta en mal estado	2,5
16	Mango en mal estado	Fruta en mal estado	0,3
	Guayaba en mal estado		0,3
	Lulo en mal estado		0,3
17	Flor de la manzanilla, hojas de laurel, hierbabuena, romero, etc	Hojas y/o tallos	5
18	Cáscara de piña	Cáscara de fruta	25

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

	Uchuva en mal estado	Fruta en mal estado	25
19	Cáscara de sandía		5
	Cáscara de naranja	Cáscara de fruta	5
	Cáscara de papaya		5
	Cáscara de banano		5
20	Cáscara de banano	Cáscara de fruta	30
21	Aguacate en mal estado	Fruta en mal estado	2
22	Tusa y cáscara de mazorca	Cáscara de verdura	12,5
	Cáscara de yuca	Cáscara de verdura	12,5
	Cáscara de arvejas	Cáscara de verdura	12,5
	Cáscara de frijol	Cáscara de verdura	12,5
23	Cáscara de yuca	Cáscara de verdura	20
24	Cáscara de zanahoria	Cáscara de verdura	0,5
	Cáscara de arveja	Cáscara de verdura	0,5
	Cáscara de habichuela	Cáscara de verdura	0,5
	Cáscara de frijol	Cáscara de verdura	0,5
25	Cáscara de piña	Cáscara de fruta	5
	Piña en mal estado	Fruta en mal estado	5
26	Cáscara de zanahoria	Cáscara de verdura	1,25
	Plátano maduro en mal estado	Fruta en mal estado	1,25
27	Cáscara de piña	Cáscara de fruta	5
	Naranja en mal estado	Fruta en mal estado	5
28	Hojas, tallos de apio	Hojas y/o tallos	10
29	Cáscara y semillas de tomate	Cáscara de fruta	15
30	Papaya en mal estado	Fruta en mal estado	5
31	Mango en mal estado	Fruta en mal estado	5
32	Tomate en mal estado	Fruta en mal estado	5
	Plátano maduro en mal estado	Fruta en mal estado	5
33	Cáscara de banano	Cáscara de fruta	2
	Cáscara de papaya	Cáscara de fruta	2
34	Cebolla morada en mal estado	Verdura en mal estado	2,5
	Cebolla larga en mal estado	Verdura en mal estado	2,5
	Tomate en mal estado	Fruta en mal estado	5
35	Tomate en mal estado	Fruta en mal estado	2
36	Brócoli en mal estado	Verdura en mal estado	5
37	Hojas, tallos de perejil	Hojas y/o tallos	1
38	Cáscara de piña	Cáscara de fruta	1
39	Cáscara de piña	Cáscara de fruta	2
40	Banano en mal estado	Fruta en mal estado	2

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA






41	Cáscara de yuca	Cáscara de verdura	30
42	Cáscara de naranja	Cáscara de fruta	10
43	Fresa en mal estado	Fruta en mal estado	10
44	Cáscara de piña	Cáscara de fruta	10
45	Cáscara de yuca	Cáscara de verdura	20

**A.3. Frecuencia de los residuos orgánicos**















La Tabla A3 presenta un inventario detallado y gráfico de los residuos orgánicos que se generaron en la Plaza de Mercado Guarín según las encuestas que fueron aplicadas a los trabajadores presentes, documentando la frecuencia de aparición de distintos tipos de desechos categorizados en frutas, verduras y especies aromáticas generando tres tipos principales de residuos: cáscaras (el más común), productos en mal estado y restos de limpieza como hojas y/o tallos.

**Tabla A3**

*Frecuencia de residuos orgánicos en la plaza según su clasificación*

Producto	Nombre científico	Residuo	Fruta o Verdura	Tipo de residuo	Frecuencia
	Persea americana	Aguacate común	Fruta	En mal estado	3
	Ocimum basilicum	Albahaca	Hojas	Tallos/Semillas	3
	Apium graveolens	Apio	Verdura	Tallos/Semillas	1
	Pisum sativum	Arveja	Verdura	Cáscara	2
	Musa acuminata	Banano	Fruta	En mal estado	2





## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

		Banano	Fruta	Cáscara	4
	Brassica oleracea var. italica	Brócoli	Verdura	En mal estado	1
	Allium cepa	Cebolla morada	Verdura	En mal estado	1
	Allium fistulosum	Cebolla larga	Verdura	En mal estado	1
	Coriandrum sativum	Cilantro	Hojas	Tallos/Semillas	1
	Prunus domestica	Ciruella	Fruta	En mal estado	1
	Fragaria × ananassa	Fresa	Fruta	En mal estado	1
	Phaseolus vulgaris L.	Frijol rojo	Verdura	Cáscara	2
	Psidium	Guayaba	Fruta	En mal estado	1
	Phaseolus vulgaris L.	Habichuela	Verdura	Cáscara	1
	Mentha spicata	Hierbabuena	Hojas	Tallos/Semillas	3
	Solanum quitoense Lam.	Lulo	Fruta	En mal estado	1
	Zea mays	Maíz	Verdura	Cáscara	2
	Mangifera indica	Mango	Fruta	En mal estado	2
	Malus domestica	Manzana	Fruta	Cáscara	1
		Manzana	Fruta	En mal estado	1

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

	Chamaemelum nobile	Manzanilla	Hojas	Tallos/Semillas	3
	Citrus × sinensis	Naranja	Fruta	En mal estado	2
		Naranja	Fruta	Cáscara	3
	Laurus nobilis	Laurel	Hojas	Tallos/Semillas	3
	Solanum tuberosum	Papa	Verdura	Cáscara	1
	Carica papaya	Papaya	Fruta	Cáscara	4
		Papaya	Fruta	En mal estado	1
	Petroselinum crispum	Perejil	Hojas	Tallos/Semillas	1
	Ananas comosus	Piña	Fruta	Cáscara	8
		Piña	Fruta	En mal estado	1
	Musa × paradisiaca	Plátano	Fruta	En mal estado	2
	Salvia rosmarinus	Romero	Hojas	Tallos/Semillas	3
	Citrullus lanatus	Sandía	Fruta	Cáscara	1
	Solanum sect. Lycopersicon	Tomate	Fruta	Cáscara	1
		Tomate	Fruta	En mal estado	4

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

		Tomate	Fruta	Tallos/Semillas	1
	Physalis peruviana	Uchuva	Fruta	En mal estado	2
	Vitis vinifera	Uva	Fruta	En mal estado	1
	Manihot esculenta Crantz	Yuca	Verdura	Cáscara	5
	Daucus carota	Zanahoria	Verdura	Cáscara	3

### Apéndice B (Cálculo de indicadores financieros)

#### B.1. Flujo neto de caja (FNC)

El flujo neto de caja corresponde a la diferencia entre los ingresos y los egresos (Molina Morejón *et al.*, 2020).

$$FNC_t = Ingresos_t - Egresos_t \quad (\text{Ec. B1})$$

Donde  $FNC_t$  es el flujo neto de caja en el año  $t$ ,  $Ingresos_t$  los ingresos por ventas o ahorros en energía en el año  $t$  y  $Egresos_t$  los costos operativos en el año  $t$ .

#### B.2. Valor actual neto (VAN)

El valor actual neto refleja el valor presente de los flujos netos de caja descontados a una tasa de descuento, menos la inversión inicial (Molina Morejón *et al.*, 2020).

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{FNC_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (\text{Ec. B2})$$

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Donde  $FNC_t$  es el flujo neto de caja en el año  $t$ ,  $r$  la tasa de descuento (nominal o real),  $n$  el horizonte de evaluación (años) y  $I_0$  la inversión inicial (CAPEX).

### B.3. Tasa interna de retorno (TIR)

La tasa interna de retorno es la tasa de descuento que hace que el valor actual neto sea igual a cero (Molina Morejón *et al.*, 2020).

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FNC_t}{(1+TIR)^t} - I_0 \quad (\text{Ec. B3})$$

Donde  $FNC_t$  es el flujo neto de caja en el año  $t$ ,  $n$  el horizonte de evaluación (años) y  $I_0$  la inversión inicial (CAPEX).

### B.4. Periodo de recuperación de la inversión (payback simple)

El payback simple corresponde a los años necesarios para que la suma acumulada de los flujos netos de caja iguale o supere la inversión inicial (Molina Morejón *et al.*, 2020).

$$\text{Payback simple} = \min \{ k \mid \sum_{t=1}^k FNC_t \geq I_0 \} \quad (\text{Ec. B4})$$

Donde  $FNC_t$  es el flujo neto de caja en el año  $t$ ,  $TIR$  la tasa interna de retorno y  $I_0$  la inversión inicial (CAPEX).

Finalmente, con el fin de garantizar la trazabilidad y transparencia de los resultados obtenidos en el presente estudio se elaboraron las memorias de cálculo correspondientes a cada etapa del dimensionamiento y análisis técnico–económico del sistema propuesto. Dichas memorias incluyen el detalle de las operaciones matemáticas, supuestos, parámetros de diseño y resultados intermedios que respaldan las cifras presentadas en el documento principal. Para

## SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

facilitar su consulta se han dispuesto en un archivo anexo accesible mediante el siguiente vínculo electrónico: [MEMORIAS DE CÁLCULO](#), lo cual permite la verificación independiente de los procedimientos realizados y constituye un soporte adicional a la validez de la investigación.