



**Generación con biogás para pequeñas granjas porcícolas**

Sebastián Moisés Chica Medrano

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Electricista

Asesores

Esteban Velilla Hernández, Ingeniero Electricista

Esteban Vargas Angel, Ingeniero Electricista

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Eléctrica

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

---

Cita	Chica Medrano [1]
<b>Referencia</b>	[1] S. M. Chica Medrano, “Generación con biogás para pequeñas granjas porcícolas”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.

---

Estilo IEEE (2020)



**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla.

**Jefe departamento:** Noé Alejandro Mesa Quintero.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

---

**CONTENIDO**

I.	RESUMEN .....	5
II.	INTRODUCCIÓN .....	6
III.	OBJETIVOS.....	8
IV.	MARCO TEÓRICO.....	9
V.	OPERATIVIDAD Y MANTENIMIENTO DE LA PLANTA DE BIOGÁS – GRANJA CINMEX.....	13
VI.	SINCRONIZACIÓN DEL GENERADOR A LA RED .....	22
VII.	CONTROL E INSTRUMENTACIÓN DEL SISTEMA DE SINCRONIZACIÓN.....	25
VIII.	ANÁLISIS DE INYECCIÓN DE ARMÓNICOS A LA RED POR PARTE DEL GENERADOR .....	29
IX.	DISEÑO DEL SISTEMA DE POTENCIA .....	31
X.	ANÁLISIS DE COSTO-BENEFICIO DEL PROYECTO DE GENERACIÓN CON BIOGÁS PARA PEQUEÑAS GRANJAS PORCÍCOLAS.....	34
XI.	ANÁLISIS.....	40
XII.	CONCLUSIONES .....	41
XIII.	REFERENCIAS .....	42
XIV.	ANEXO A. FOTOS DEL PROYECTO CES .....	43

---

**LISTA DE TABLAS**

<b>Tabla I.</b> Características del transformador de corriente (TP). Este TP trabaja en el rango de operación del voltaje del sistema de distribución donde se encuentra la granja, por lo que es ideal para monitorear la medida para la sincronización del generador a la red. ....	26
<b>Tabla II.</b> Datos de placa del motor GX390H2 - QXE. Información extraída de la ficha técnica del fabricante. ....	27
<b>Tabla III.</b> Datos de placa del generador E1C10S F5.0. Información extraída de la ficha técnica del fabricante. ....	27
<b>Tabla IV.</b> Límites máximos de Distorsión Total de Tensión .....	30
<b>Tabla V.</b> Límites de distorsión armónica de corriente de rango de 120 V a 69 kV .....	31
<b>Tabla VI.</b> Cálculos de cableado, protecciones y tubería empleada para cada circuito del proyecto. ....	33
<b>Tabla VII.</b> Resumen del presupuesto. ....	35
<b>Tabla VIII.</b> Recurso humano. ....	35
<b>Tabla IX.</b> Detalles constructivos y presupuesto. ....	35
<b>Tabla X.</b> Presupuesto de las pruebas de laboratorio. ....	37

## I. RESUMEN

Colombia es un país rural, y el motor de su economía ha dependido fuertemente del sector agropecuario. Un gran porcentaje del aporte a este sector lo realizan los pequeños campesinos y productores que dependen de la ganadería y el cultivo para su subsistencia, sin embargo, dadas las condiciones socioeconómicas por las que atraviesa el país, gran parte de la población campesina y productora ha visto afectada su producción debido a fenómenos climatológicos propios del territorio colombiano, abandono estatal, conflicto armado interno y desconocimiento de políticas agrarias y de la tecnología actual. En los últimos años, las políticas gubernamentales han buscado favorecer y estimular el crecimiento de dicho sector, a la vez que se incentiva el cuidado del medio ambiente y el uso eficiente de los recursos. Estas consideraciones han motivado a buscar soluciones eficaces ante el problema ambiental y el tratamiento seguro de los residuos orgánicos que derivan del sector agropecuario. El proceso de transformación de la gran mayoría de productos orgánicos requiere de procedimientos que demandan grandes cantidades de energía y el aprovechamiento final de estos recursos representa un pequeño porcentaje, por lo que se desaprovecha una gran cantidad de energía que, finalmente, se refleja en pérdidas económicas. Por otro lado, los subproductos orgánicos requieren de procedimientos seguros para evitar la contaminación y propagación de enfermedades que podrían afectar la calidad de vida de los seres vivos. El presente trabajo se enfoca en exponer una alternativa de recuperación de la energía desaprovechada en el ciclo de transformación de la biomasa, a bajo costo y accesible para los pequeños productores, a través del uso del biodigestor como elemento que permite almacenar la biomasa residual y, a través de procesos anaeróbicos, producir biogás que, finalmente, se puede aprovechar en aplicaciones como suministro de energía eléctrica, térmica y fertilizantes para la agricultura, a su vez que garantiza un tratamiento seguro de tales residuos.

**Palabras claves:** *Biogás, sector agropecuario, residuos orgánicos; subproductos orgánicos, biodigestor, biomasa residual, procesos anaeróbicos.*

## II. INTRODUCCIÓN

Colombia es un país que se encuentra ubicado geográficamente en la región ecuatorial del continente americano, de modo que su extensión territorial favorece el desarrollo de fauna y flora en abundancia, caracterizada por su gran diversidad. La economía colombiana se mueve principalmente por medio de la exportación de recursos mineros y productos agropecuarios y la sostiene, en gran porcentaje, la contribución de pequeños campesinos y productores agropecuarios. Estas actividades producen gran cantidad de residuos líquidos, sólidos y gaseosos que generan inconvenientes derivados de la insalubridad y que pueden afectar al medio ambiente, la salud humana y el normal desarrollo de los procesos industriales si no se tienen esquemas que permitan hacer un tratamiento adecuado a tales desechos.

El aprovechamiento de la materia orgánica (biomasa) derivada de los procesos industriales agropecuarios para la generación de energía eléctrica, es una de las alternativas más favorables a nivel nacional e internacional como forma de contribuir a la reducción de la huella de carbono, la sostenibilidad ambiental y la economía circular. Para este proyecto particular, el interés se centra en el aprovechamiento de los subproductos generados en la industria porcícola y que tienen un gran potencial de generación eléctrica, ya que los residuos tales como las heces, orina, materiales orgánicos y agua que resultan de tales procesos sirven de materia prima para procesos de biotransformación.

En el contexto colombiano, los residuos orgánicos de carácter urbano y sobrantes agropecuarios se consideran fuente eficaz para llevar a cabo proyectos de cogeneración de energía eléctrica, favorecer el desarrollo empresarial y la democratización de la energía. Una adecuada planeación de proyectos de generación de biogás a través del aprovechamiento de la biomasa residual tendría una aplicación multipropósito: suministro de electricidad, energía térmica y fertilizantes para la agricultura. Sin embargo, también se tiene un impacto ambiental positivo, ya que el uso de biodigestores permite disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, la contaminación del suelo natural, la propagación de enfermedades y malos olores. De este modo, es posible contribuir favorablemente al cuidado del medio ambiente.

El biogás se puede producir a partir de cualquier residuo orgánico biodegradable en condiciones adecuadas, de este modo, es posible que los pequeños productores rurales participen de forma efectiva en la transición energética global hacia la red eléctrica renovable y baja en carbono. A través del aprovechamiento de la energía contenida en el biogás, es posible encender un pequeño generador de electricidad que se puede sincronizar con la red y obtener ingresos adicionales que permiten compensar notoriamente la demanda de energía eléctrica de la red. Sin embargo, las tecnologías actuales son complejas para los pequeños productores y la falta de conocimiento acerca

de la operación y mantenimiento de los biodigestores han hecho de este tipo de generación una alternativa poco valorada. El propósito de este trabajo consiste en identificar e implementar las normas técnicas y tecnologías accesibles que pueden adoptar los pequeños productores rurales para generar energía eléctrica, mientras aportan de manera eficaz al cuidado del medio ambiente y disminuyen los gastos asociados a la producción de productos agrícolas y/o pecuarios y así garantizar una economía sostenible.

La empresa GSV Ingeniería enfoca sus servicios a la eficiencia energética, por lo que cuenta con las herramientas y el talento humano necesario para llevar a cabo la implementación de proyectos de generación de energía eléctrica a partir del uso de recursos renovables, en este caso particular, residuos orgánicos derivados de procesos agropecuarios. De este modo, el actual proyecto se está implementando en la granja CINMEX ubicada en el municipio de El Santuario - Antioquia, que pertenece a la universidad CES y es financiado por la empresa PorkColombia y consiste en el aprovechamiento del purín de cerdo para la producción de biogás. El purín es canalizado desde las fosas que lo almacenan en la zona de marraneras hasta dos biodigestores UASB (en inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket, en español reactor anaerobio de flujo ascendente); uno de cúpula en concreto y otro de cúpula en membrana plástica. Estos dos biodigestores tienen igual capacidad de almacenamiento, sin embargo, difieren en el domo donde se aloja el gas generado por el consorcio bacteriano, con el propósito de estudiar aspectos económicos, operativos y de producción. Finalmente, el biogás producido se filtra y se presuriza según requiera el motor de combustión interna (CI) para su funcionamiento, este último se encuentra acoplado a un generador que convertirá la energía mecánica transmitida a su eje a energía eléctrica disponible en sus bornes.

Para garantizar cada una de las etapas para la producción de biogás y su posterior aprovechamiento en energía eléctrica y térmica, es necesario garantizar los siguientes procesos:

- Obtención de materia prima que corresponde a la materia orgánica disponible en el sitio donde se va a instalar el proyecto.
- Almacenamiento de la materia orgánica en contenedores herméticos que permitan garantizar su completo aislamiento del exterior.
- Mantener un rango de temperatura para la materia orgánica que vaya desde 25°C a 35°C.
- Agitar el contenido de forma periódica y suave, de modo que no se tengan gradientes de temperatura excesivos en el interior.
- Reemplazar la materia orgánica por materia fresca luego de un periodo estimado de 30 días.
- Canalizar el biogás producido hasta el reservorio, a una presión y temperatura dada.

- Filtrar los elementos químicos nocivos que se agregan a la producción de metano.
- Transformar la energía térmica, producto de la combustión del biogás, en energía eléctrica, empleando un generador a pequeña escala.
- Sincronizar el generador con el sistema interconectado nacional para inyectar la energía eléctrica producida.

### III. OBJETIVOS

#### A. *Objetivo General*

Analizar técnica y económicamente la construcción de un sistema de generación de energía eléctrica a través de la biodigestión de la porcínaza a pequeña escala.

#### B. *Objetivos Específicos*

- Implementar sistema de generación de energía eléctrica a través de la biodigestión de porcínaza en pequeñas granjas, considerando el sistema de control para la automatización de los procesos involucrados.
- Analizar el desempeño del sistema de control y potencia para la biotransformación de la porcínaza, generada en pequeñas granjas porcícolas, en energía eléctrica.
- Analizar el costo-beneficio de la construcción e implementación del sistema de control y automatización de procesos de aprovechamiento energético de la porcínaza para pequeñas granjas porcícolas.

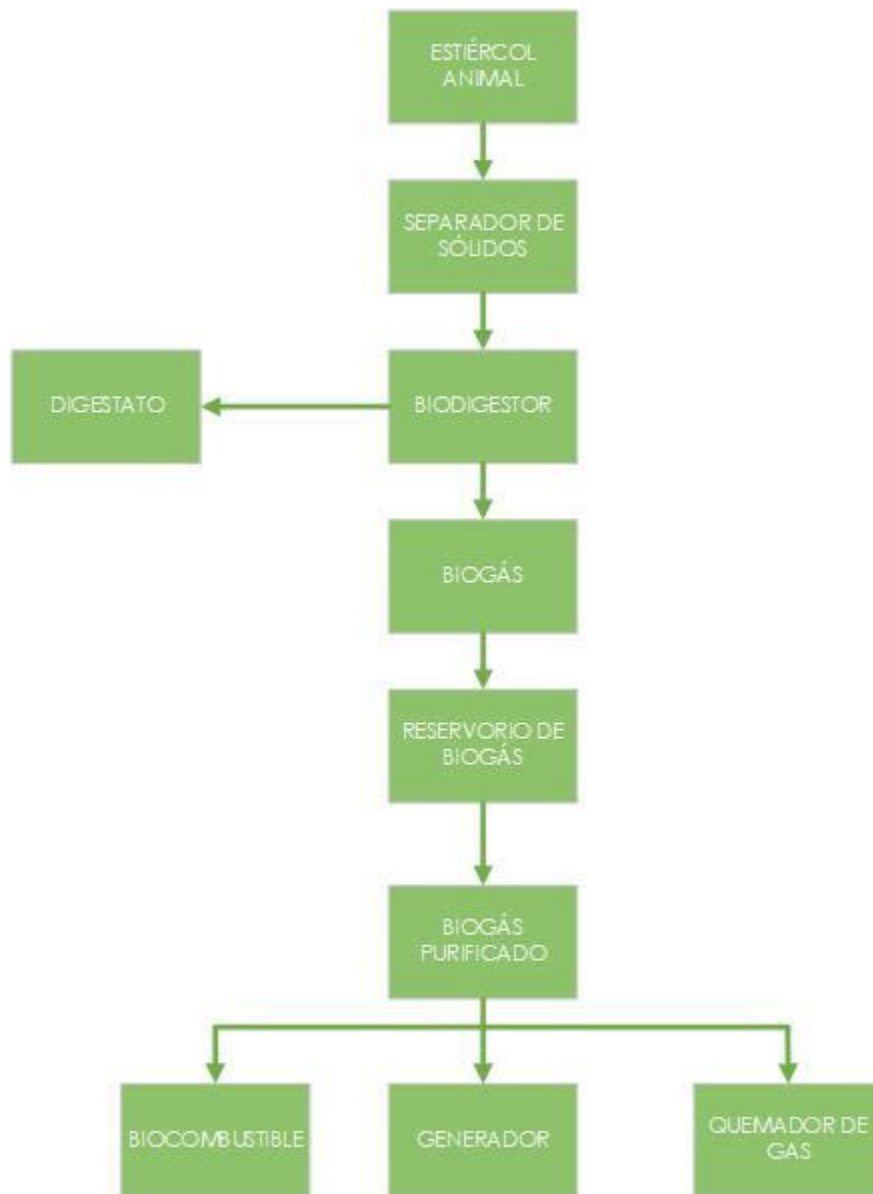


#### IV. MARCO TEÓRICO

La generación de biogás representa una de las mejores soluciones viables y sostenibles que se pueden implementar fácilmente y con pocos recursos y tiempo. Sin embargo, implementar una planta de biogás requiere de estudios específicos del lugar donde se desea instalar, ya que diferentes áreas de implementación requieren diseños y estudios específicos debido a que factores como el volumen y la disponibilidad de materia prima han demostrado ser claves para el proyecto. Debido a los altos costos de construcción y operación de la tecnología de biogás, el desarrollo de esta alternativa de generación se ha visto obstaculizado y tenido poco en cuenta. En [1] se detalla un estudio realizado en China que permitió identificar los diferentes beneficios de la producción de biogás para mejorar la productividad agrícola y el suministro de energía eléctrica. De acuerdo con estos resultados, la implementación del biodigestor para la producción de biogás tiene la capacidad de mejorar la productividad y los ingresos económicos en los proyectos rurales. La energía renovable producida por el biodigestor puede ser aprovechada por un motor de CI que alimenta un generador y este, a su vez, entrega potencia eléctrica a los hogares y a la red eléctrica nacional, de modo que un pequeño productor puede emplear tal energía para necesidades básicas de su hogar o finca. La mayoría de digestores se encuentran en India y China, y de acuerdo con estudios realizados, esta alternativa permitió el reemplazo de la leña como combustible y la disminución de la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. En China, por ejemplo, los digestores implementados pudieron satisfacer el 4% de la demanda de energía del país. A pesar de ser una tecnología que ofrece grandes beneficios ambientales y socioeconómicos, aún existe la creencia de las dificultades que representa el mantenimiento y operación de los biodigestores, debido a la dificultad, falta de logística y estándares a seguir para tales propósitos.

##### **Proceso de producción de biogás**

La energía que contiene el biogás se considera como un tipo de energía renovable que se produce a partir de la transformación química de materias primas de origen biológico en un ambiente libre de oxígeno, y que puede utilizarse para generar calor, electricidad o como biocombustible. Esta transformación la llevan a cabo diferentes grupos de bacterias que interactúan secuencialmente y cuyo proceso se conoce como digestión anaerobia. El proceso de producción de biogás se muestra en la ilustración I.



**Figura 1.** Diagrama de proceso de producción de biogás. Se parte de la captación de la materia orgánica que luego es filtrada para garantizar su almacenamiento en los biodigestores que, luego de un tiempo y a través de la digestión anaeróbica, se genera biogás que se aprovecha para diferentes usos.

Sin embargo, es importante aclarar que este proyecto solo se centra en la producción de biogás para su transformación en energía eléctrica.

La *digestión anaerobia* es el proceso por el cual los microorganismos descomponen la materia orgánica biodegradable en ausencia de oxígeno [2]. Este proceso requiere de los siguientes pasos críticos que ocurren en el biodigestor:

- I. **Hidrólisis:** Es el proceso por el cual complejas moléculas orgánicas se descomponen en azúcares, aminoácidos y ácidos grasos simples.

- II. Acidogénesis:** Proceso microbiológico en el cual aminoácidos y azúcares simples son degradados a ácidos grasos volátiles, principalmente acetato.
- III. Acetogénesis:** Proceso microbiológico en el cual ocurre la degradación de ácidos grasos volátiles a acetato e hidrógeno.
- IV. Metanogénesis:** Proceso microbiológico en el cual el acetato e hidrógeno son convertidos a metano y dióxido de carbono.

### **Medición e instrumentación de la operación de los biodigestores UASB**

Una planta de biogás se define como un sistema físico-químico complejo, que se conforma por varios subsistemas biológicos interconectados que interactúan permanentemente dentro del biodigestor. Para mantener la eficiencia de operación de los biodigestores, y, de este modo alcanzar la mayor producción de biogás, es necesario realizar monitoreo y control permanente de las variables que rigen las condiciones óptimas para su productividad. Entre los parámetros físicos y químicos más relevantes en este proceso están la presión, temperatura, volumen, fracción de masa, PH, CO<sub>2</sub>, etc. Estos parámetros influyen directamente en el bienestar de los microorganismos y una medición correcta del nivel de producción de biogás garantiza que los microorganismos estén en su máxima capacidad digestiva. Cuando los parámetros que gobiernan el ecosistema propicio para la producción de biogás se mantienen en valores adecuados, se dice que la planta funciona de forma eficiente. A continuación, se definen los parámetros más importantes.

#### **Temperatura**

La temperatura es un factor determinante en la producción de biogás, ya que determina la velocidad de las reacciones químicas e influye sobre la salud de los microorganismos. Los microorganismos que se encuentran comúnmente en la materia orgánica contenida en los biodigestores son termófilos y mesófilos. Los microorganismos termófilos son eficientes a temperaturas que van de 45°C a 80°C, mientras que los mesófilos prefieren temperaturas que van de 25°C a 40°C. Sin embargo, de acuerdo con resultados de pruebas experimentales, se ha encontrado que la mayoría de los biodigestores funcionan en forma óptima dentro de los límites de temperaturas mesófilas entre 35°C y 37°C.

Para realizar el control de la temperatura, se instalaron sensores de temperatura dentro de los biodigestores. Estos se ubicaron de manera estratégica para que las mediciones sean más acordes con el valor de temperatura relevante en el sustrato.

#### **PH**

El PH define el nivel de acidez presente en el sustrato. Es un parámetro de suma importancia ya que influye en el proceso de digestión anaerobia y de él depende la producción de metano. Los rangos de producción óptima para el consorcio bacteriano pueden variar según la especie de

bacteria, sin embargo, se ha demostrado que un PH óptimo se puede dar entre 5.2 y 6.3 para bacterias que producen ácidos y entre 6.7 y 7.5 para bacterias que producen metano.

De acuerdo con lo anterior, el PH debe mantenerse entre 6.5 y 7.5 para obtener una alta producción de metano y un adecuado aprovechamiento de la materia orgánica.

### **Potencial de reducción (REDOX)**

El potencial de reducción es un valor electroquímico que sirve de indicador de la presencia de oxígeno en el proceso anaeróbico. Cuando el Redox es negativo, se dice que hay poco oxígeno en el proceso. Este indicador permite determinar el nivel de oxidación o potencial de reducción de la materia. Los procesos anaerobios se dan en medios acuosos con un potencial de reducción que se encuentra en el rango de -330 mV a -550 mV.

El potencial de reducción, así como el PH, se deben medir continuamente, ya que valores por fuera del rango anterior indican que hay presencia de agentes oxidantes que pueden ocasionar cambios abruptos en el ecosistema microbiano, poniendo en riesgo la vida de los microorganismos y la producción de metano.

### **Relación FOS/TAC**

La relación FOS/TAC es un valor guía que permite evaluar los procesos de fermentación, puesto que es un valor que determina el cociente de la concentración ácida y la capacidad compensadora del sustrato de fermentación. Esta relación es crucial porque da indicios de los problemas que se dan en el proceso que pueden hacer colapsar el sistema biológico en el biodigestor. Por lo tanto, el operador de la planta puede tomar medidas a tiempo para evitar consecuencias catastróficas para el ecosistema microbiano y la producción de biogás.

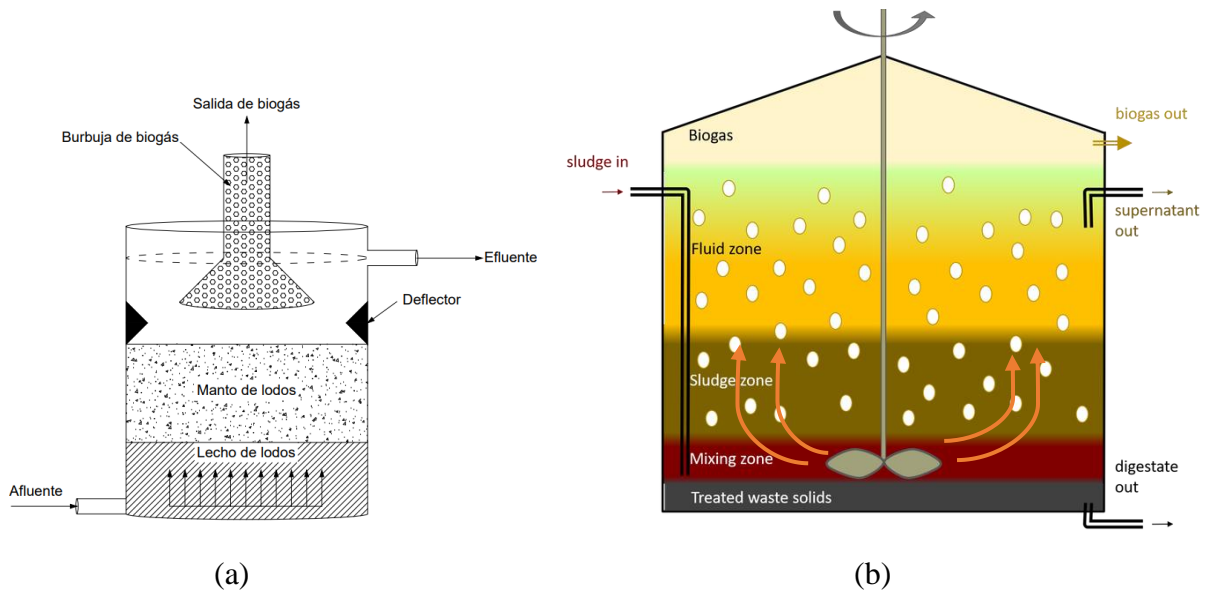
En la práctica, la relación FOS/TAC óptima para cada planta suele ser diferente. Este valor se determina mediante un monitoreo a largo plazo y los controles regulares del proceso, puesto que depende fuertemente del sustrato. Una relación FOS/TAC normal se ubica entre 0,3 y 0,4.

### **Digestor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodo (UASB)**

En el reactor anaerobio de manto de lodo, el efluente ingresa por la parte inferior del biodigestor, en sentido ascendente, pasando a través de un lecho de lodo denso y de elevada actividad y abandonando el biodigestor por la parte superior. El perfil de sólidos del sustrato en el biodigestor varía de muy denso, cercano al fondo, llamada lecho de lodos, hasta un lodo más disperso y liviano, cercano a la parte superior del biodigestor, llamado manto de lodos.

La operación de los biodigestores UASB se basa en la actividad autorregulada de diferentes especies de bacterias que transforman la materia orgánica, interacción se desarrolla

secuencialmente, formando un lodo biológicamente activo en el biodigestor. A continuación, se muestra un esquema general de un biodigestor UASB:



**Figura II.** Esquemático de un biodigestor UASB. Panel (a) Partes que constituyen un biodigestor UASB. Como muestra la gráfica, existen diferentes regiones en el interior del biodigestor que son formadas a causa de las condiciones ambientales y la dinámica del ecosistema microbiano. Esta estructura permite captar el biogás evitando, lo mayor posible, la filtración de sólidos volátiles y humedad. Panel (b) agitación del contenido en un reactor UASB con motor de eje largo y hélice de paso fijo, que permite producir una recirculación de la materia de manera eficaz. Imagen extraída de: <https://www.sludgeprocessing.com/blog/sludge-incineration-vs-anaerobic-digestion-the-simple-truth/>

De acuerdo con la gráfica II, la materia orgánica ingresa por la parte inferior del biodigestor y es donde se realiza el primer contacto de materia fresca con materia digerida. Esto permite que la materia fresca sea invadida por el consorcio bacteriano y se garantice una mejor mezcla de nutrientes. La agitación debe ser de tal modo que todo el contenido se mueva y no existan zonas muertas que disminuyan el volumen operativo del digestor. En el panel a, se muestran las regiones que se forman en el interior de los biodigestores a causa de la actividad bacteriana y las condiciones ambientales internas. En el panel b, el contenido se agita de modo que se produce un flujo ascendente de la materia y la mezcla se logra en todo el contenido.

## V. OPERATIVIDAD Y MANTENIMIENTO DE LA PLANTA DE BIOGÁS – GRANJA CINMEX

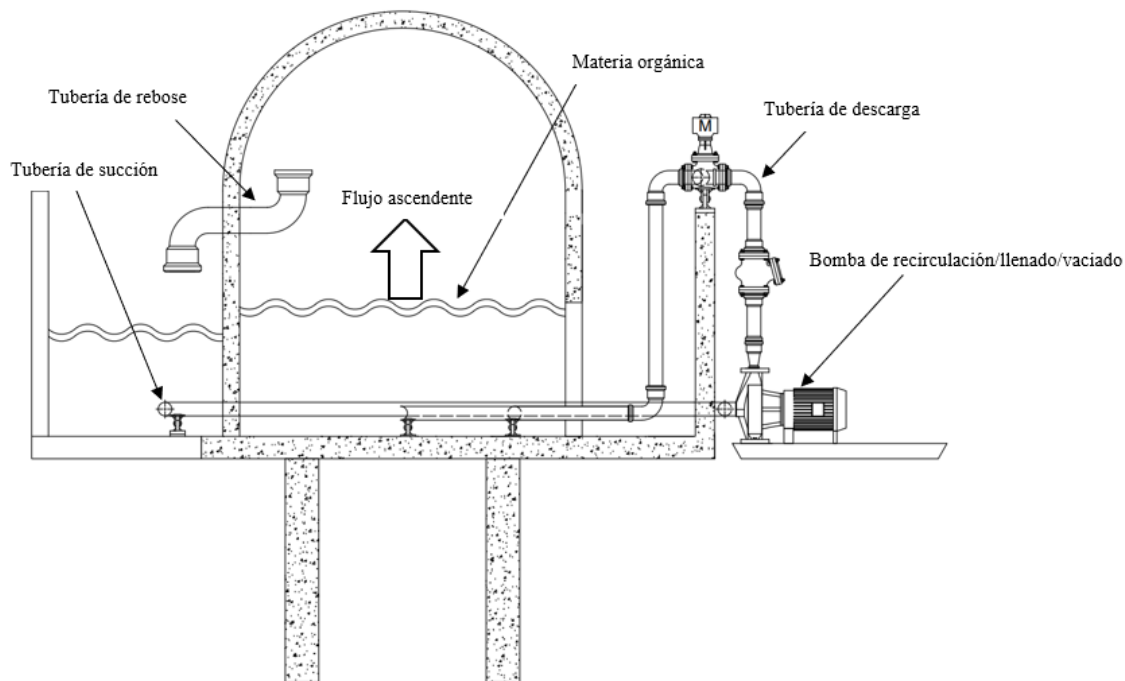
### Etapa biodigestor

Para alcanzar una gestión adecuada de la producción de biogás, y, por lo tanto, un rendimiento óptimo del proceso, el biodigestor debe garantizar los siguientes aspectos: facilidad de mantenimiento, capacidad de mezcla, gestión y control de sedimentos.

### Sistema de mezclado del sustrato

Para garantizar una mayor producción de biogás, es necesario agitar la materia orgánica contenida en el biodigestor. La agitación de la materia orgánica proporciona un buen contacto entre los microorganismos y los sustratos, mejora la distribución de nutrientes y calor dentro del biodigestor, minimiza la acumulación de inhibidores intermedios, mezcla la biomasa fresca con la biomasa digerida, reduce la formación de costras, sedimentos y flóculos que pueden sedimentarse en el fondo del biodigestor, mejora y facilita la extracción de biogás. Cuando la agitación es poca, la velocidad de producción de biogás cae. Una mezcla adecuada se puede dar mediante la agitación mecánica a través de agitadores con palas o haciendo recircular los lodos.

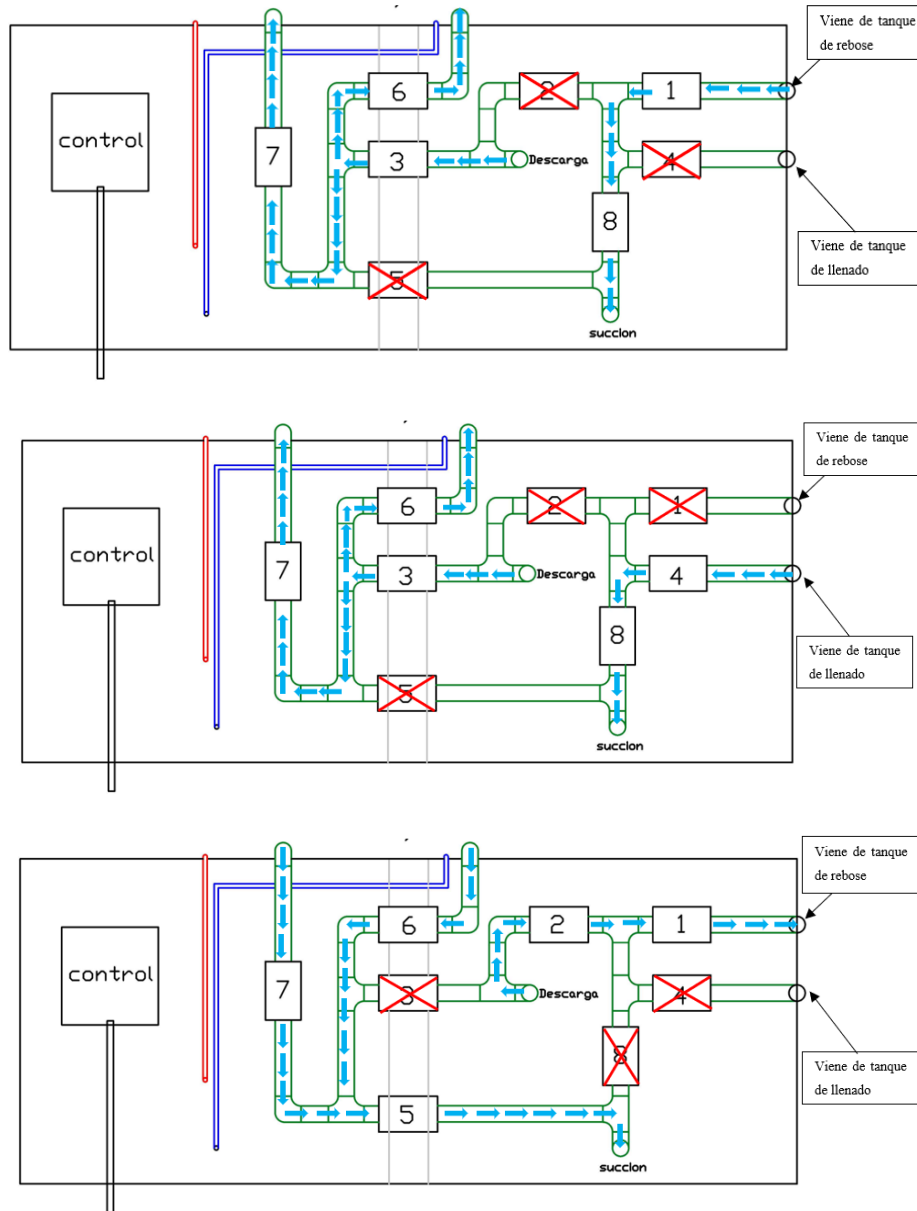
En la implementación del sistema de agitación o recirculación de la materia orgánica del proyecto objeto de este estudio, se empleó una bomba autocebante que bombea el estiércol líquido desde un tanque de rebose hasta los biodigestores. Cuando los tanques han llegado a su capacidad máxima, estos escurren el líquido de nuevo al tanque de rebose, produciéndose así una recirculación adecuada del contenido. El líquido ingresa por la parte inferior de los biodigestores y retorna al tanque de rebose por la parte superior de los mismos, obteniendo así un flujo ascendente. A continuación, se ilustra el esquemático correspondiente del sistema de recirculación:



**Figura III.** Esquemático del sistema de recirculación/llenado/vaciado de los biodigestores. Cada modo de operación se gestiona a partir de la apertura y cierre de válvulas. Este sistema de válvulas permite establecer el tipo de operación en los biodigestores con el uso de una sola electrobomba.

El bombeo que se requiere en los procesos del proyecto se enfoca en los siguientes propósitos: recirculación de materia orgánica, llenado y vaciado de los biodigestores. Estos procesos se realizan con una única bomba, por lo que para lograr el cumplimiento de este objetivo, se diseñó un sistema de válvulas que permite establecer cada modo cerrando y abriendo válvulas.

Para armar el sistema de bombeo en modo recirculación, es necesario establecer la condición de apertura y cierre de válvulas que se muestra en la figura IV (a).



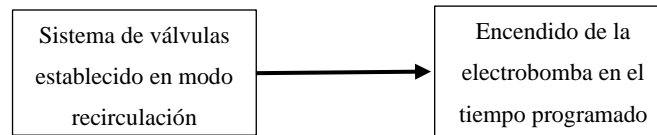
**Figura IV.** Sistema de válvulas en (a) modo recirculación/(b) llenado/(c) vaciado de los biodigestores. Cada modo de operación requiere de condiciones específicas de operatividad, tales como la protección de la bomba contra la succión en vacío, apertura y cierre de válvulas definidos, etc.

Donde las equis rojas (X) indican cuáles son las válvulas que deben cerrarse y las flechas azules indican la dirección del fluido.

La válvula 7 controla el ingreso de materia orgánica al biodigestor con domo de concreto y la válvula 6 al biodigestor con domo de membrana plástica. Este sistema de válvulas se encuentra

enclavado en la pared que divide los dos reactores, en la parte exterior, y es de fácil acceso para el operador de la planta.

La válvula 1 se encuentra en la tubería del tanque de rebose y la 4, en la tubería del tanque separador de sólidos, de donde proviene el suministro de materia orgánica. Por lo tanto, abrir la válvula 1 y cerrar la 4 corresponde a establecer el sistema de bombeo en modo recirculación de materia orgánica, y abrir la válvula 4 y cerrar la 1, en modo llenado de biodigestores. El control de los modos de bombeo se realiza a través de servomotores que abren y cierran estas válvulas según se haya programado su funcionamiento. El sistema de control de la bomba en el modo de recirculación, es un sistema de lazo abierto, ya que solo depende del tiempo establecido por el operador de la planta o del tiempo programado para su funcionamiento, como se muestra en el esquema I. El sistema de recirculación no requiere de flotador eléctrico para protección de la bomba contra la succión en vacío, ya que el nivel de los tanques no cambia.



*Esquema I. Sistema de control de lazo abierto para la electrobomba en modo recirculación. Este modo solo depende del tiempo de operación establecido.*

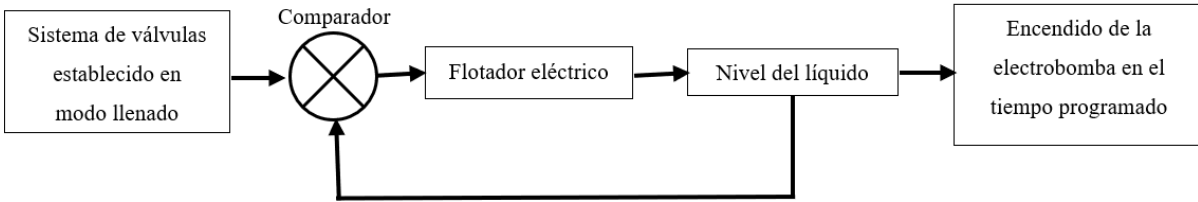


*Figura V. Servomotor ilustrativo empleado para controlar la apertura y cierre de válvulas de los modos operativos del sistema de bombeo.*

### **Modo llenado de los biodigestores**

Para establecer el modo llenado de los biodigestores, el sistema de válvulas se configura como se muestra en la ilustración IV (b). Este modo permite llenar con materia fresca los tanques biodigestores. Al mismo tiempo, recircula el contenido en el tiempo en que ocurre el llenado. El sistema de control para este modo es un sistema de lazo cerrado que depende del nivel de líquido disponible en el tanque de llenado. A través del uso de un flotador eléctrico, es posible establecer el funcionamiento de la electrobomba si este detecta que el nivel de líquido es suficiente para permitir el llenado de los biodigestores. El sistema de control de este modo se muestra en el esquema II.

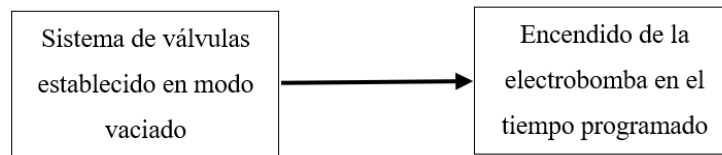




*Esquema II.* Sistema de control de lazo cerrado para la electrobomba en modo de llenado. Este modo depende del nivel en que se encuentre el tanque de llenado.

### Modo vaciado de los biodigestores

Para establecer el modo vaciado de los biodigestores, el sistema de válvulas se configura como se muestra en la ilustración IV (c). Este modo permite vaciar los tanques para propósitos de mantenimiento que requieran las unidades. El sistema de control es un sistema de lazo abierto similar al del esquema I. El tiempo de encendido de la bomba en este modo depende exclusivamente del criterio del operador de la planta.



*Esquema III.* Sistema de control de lazo abierto para la electrobomba en modo vaciado. Este modo solo depende del tiempo de operación establecido.

### Descripción de la selección y del control de la bomba

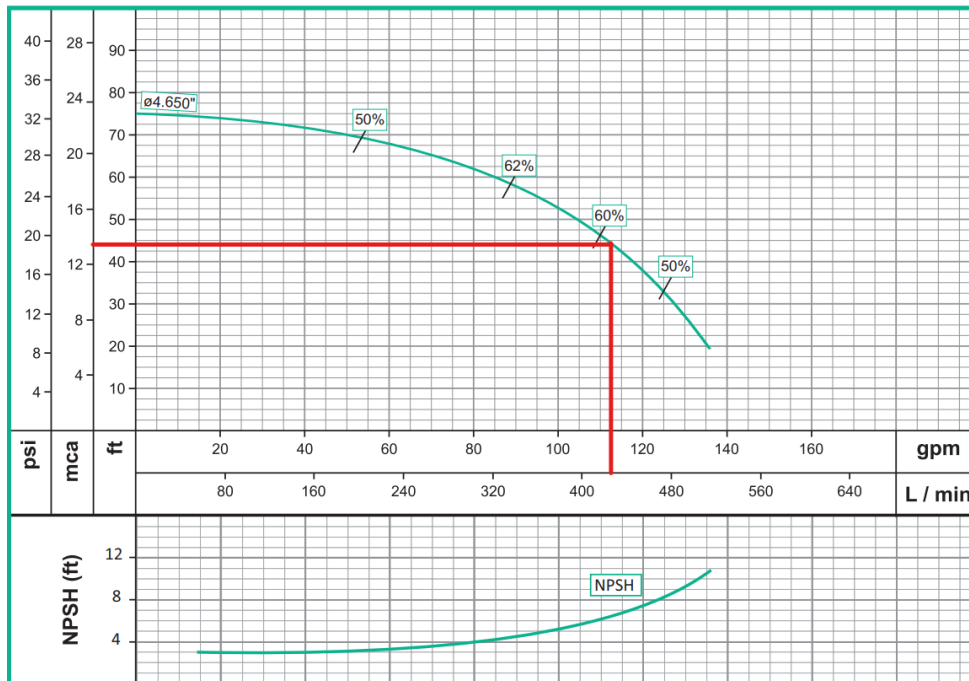
La electrobomba empleada para desplazar la materia orgánica en los biodigestores requiere de capacidad de manejo de sólidos en suspensión, resistencia a la corrosión y que posea la potencia suficiente para evitar bloquearse con mucha frecuencia. De acuerdo con los cálculos realizados, se encontró que la bomba que se muestra en la figura VI se ajusta a las necesidades del proyecto, ya que cumple con los criterios anteriormente mencionados.



*Figura VI.* Bomba autocebante de 2 HP (1,471 kW) de potencia, capaz de manejar sólidos de hasta 6 mm de diámetro.

La electrobomba es controlada a través de contactores y sensores. Para el propósito de recirculación, se desarrolló un sistema de control que establece el modo de operación según se recomienda en [3], encendiendo la bomba 4 veces por día, con el propósito de desplazar el mismo volumen de materia orgánica que contienen los dos tanques de almacenamiento. El caudal establecido, de acuerdo con la altura manométrica y la potencia de la electrobomba, se obtiene de la ficha técnica del fabricante.

El cálculo de la altura manométrica da por resultado  $H = 13.62$  metros. Con este valor, podemos hallar el caudal que proporciona la bomba, como se ilustra a continuación:

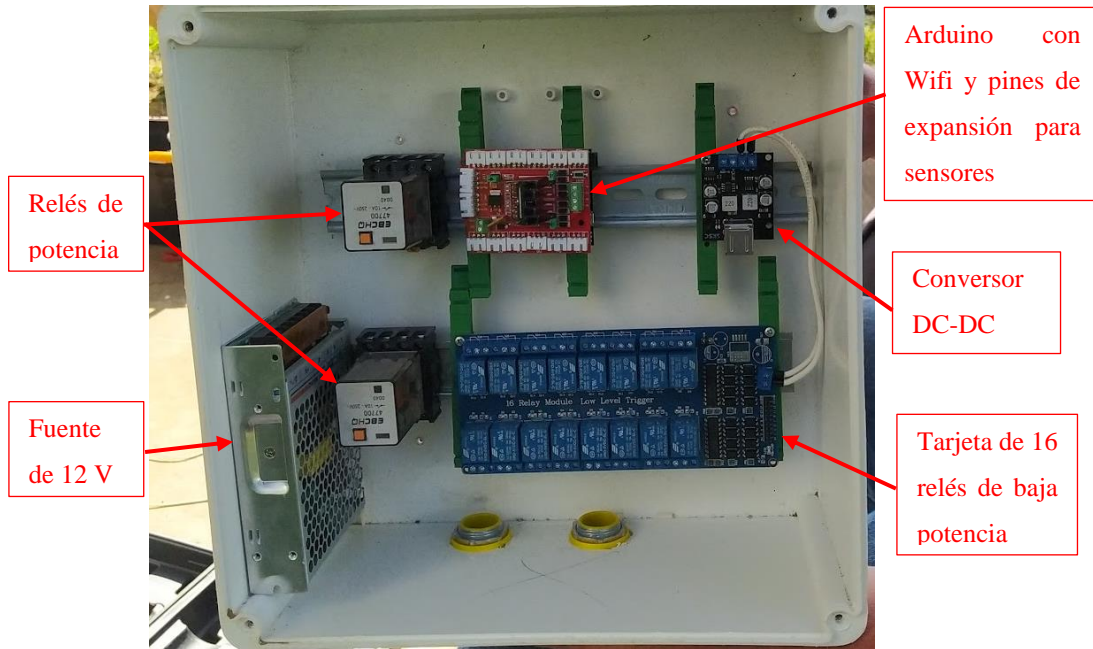


**Figura VII.** Curva característica de la bomba seleccionada para el proyecto, tomada de la ficha técnica del fabricante. Se selecciona la altura manométrica del eje vertical y se traza una línea horizontal hasta llegar a la curva, con esto, es posible encontrar el valor del caudal de la bomba en las condiciones de operación del proyecto y el NPSH disponible.

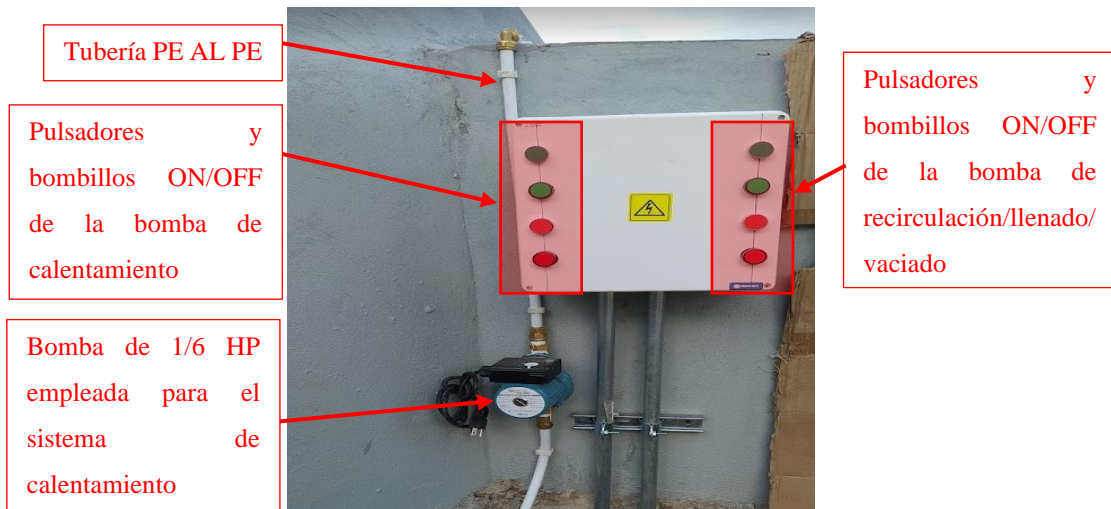
De acuerdo con la imagen 1, el caudal suministrado por la bomba es  $Q = 425 \text{ L/min} = 0.00708 \text{ m}^3/\text{s}$ . Por lo tanto, para desplazar el volumen total de los dos tanques biodigestores en 4 encendidos por día, se requerirá de un tiempo estimado de 20 minutos por encendido.

Los encendidos de la bomba se programaron en el sistema de control de la bomba, a través del uso de librerías de zona horaria, para establecer los encendidos de acuerdo con los periodos horarios predefinidos en la tarjeta programable Raspberry Pi. Adicional a esto, se usaron elementos como relés, tarjeta de Arduino y contactores para lograr tal propósito. El encendido de la bomba puede darse de forma manual o automática. El modo manual consiste en que el operador de la planta es libre de encenderla según su criterio, para este propósito se disponen de pulsadores ON/OFF en el tablero de control ubicado en casa de máquinas y la pared que divide los biodigestores (ver figura VIII); el modo automático enciende de acuerdo con las especificaciones de cada modo de

funcionamiento, por ejemplo, para el modo recirculación de la materia orgánica, se programa el encendido en periodos horarios predefinidos. Por otro lado, la bomba no tiene en cuenta el estado del flotador eléctrico del tanque de llenado, ya que, en el circuito de tubería establecido, no se considera dicho tanque. Esta consideración se programa a través de un condicional que dice que, si el sistema de válvulas se encuentra en modo de recirculación, no se tendrá en cuenta el estado en que se encuentre el flotador eléctrico.



**Figura VIII.** Tablero de control de bombas ubicado en pared que divide los tanques biodigestores. Como se observa, está compuesto por módulos de relés de baja potencia que controlan los relés de alta potencia de las bombas. El mando central ocurre en la tarjeta ordenadora Raspberry Pi, que, a través de transmisión Wifi con la tarjeta Arduino, controla el encendido de las máquinas.



**Figura IX.** Tablero de control de bombas ubicado en la pared de los tanques biodigestores. Se muestran los pulsadores ON/OFF para cada bomba con su respectiva bombilla que indica el estado en que se encuentran.



*Figura X. Tablero de control de bombas en casa de máquinas. Este corresponde al tablero de control principal del proyecto, donde se controlan todos los equipos del sistema y donde se aloja la tarjeta ordenadora Raspberry Pi.*

### **Sistema de calefacción**

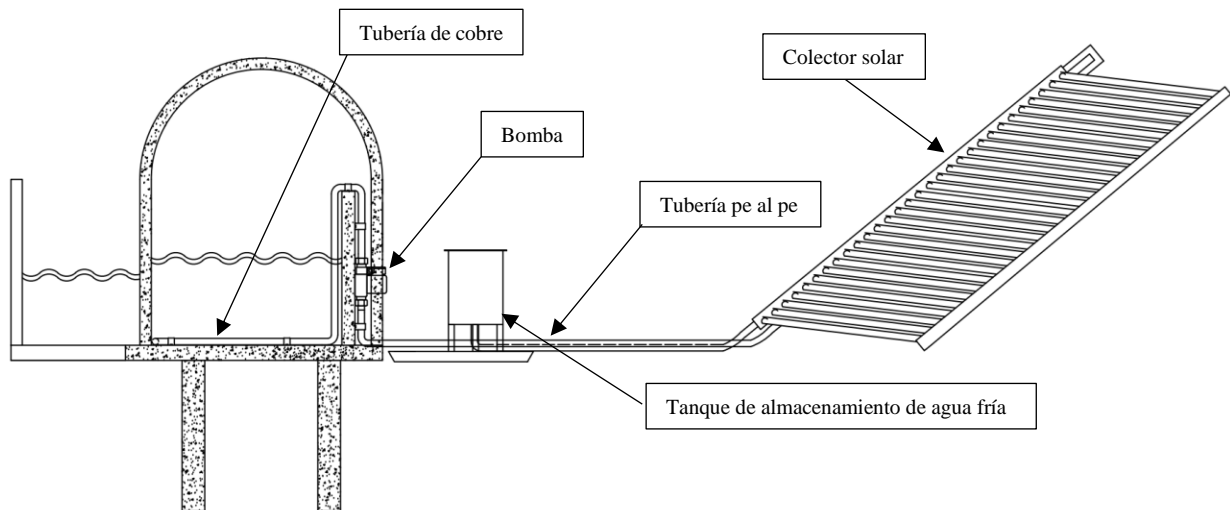
La temperatura promedio en El Santuario – Antioquia es de 17°C. De acuerdo con [4], la temperatura de funcionamiento óptimo de un biodigestor se encuentra entre 35°C y 37°C. Por lo tanto, se debe garantizar que, en promedio, el rango de temperatura del sustrato se encuentre en este rango.

Para lograr este propósito, se implementó un sistema de calefacción con colectores solares, aprovechando la energía proveniente del Sol. Se hace recircular agua caliente que proviene del colector solar usando una bomba presurizadora, esta impulsa agua fría desde un tanque que la almacena y la conduce al colector, que luego es calentada por este y se transporta hasta los biodigestores. El circuito de agua entra en los dos tanques a través de tuberías de cobre, cuya conductividad es alta y permite una buena transferencia de calor entre el agua y el sustrato.

La bomba que se empleó corresponde a una bomba presurizadora, ideal para trabajar en el rango de temperaturas recomendado para lograr una buena producción de biogás. Este sistema se conforma por los siguientes elementos: colector solar, bomba presurizadora y tanque de almacenamiento de agua. Se utiliza tubería multicapa Polietileno Aluminio Polietileno (PE AL PE) para el circuito de agua que se encuentra por fuera de los tanques y tubería de cobre flexible para el circuito que se encuentra dentro de los tanques. La tubería PE AL PE permite disminuir las pérdidas de energía calórica en el transporte del agua caliente a los biodigestores, ya que su estructura está hecha de polietileno, material que es considerado buen aislante térmico.

La bomba empleada proporciona el caudal adecuado para lograr que la transferencia de calor sea lo mayor posible en el recorrido. El encendido de esta bomba depende de la temperatura en el interior de los biodigestores. Cuando la temperatura sale del rango que va desde 35°C y 37°C, la bomba operará automáticamente, sin embargo, también se tendrá un encendido manual para que el operador pueda encender la bomba según su criterio.

A continuación, se ilustra el esquemático del sistema de calefacción:



**Figura XI.** Sistema de calentamiento de la materia orgánica

Para controlar el encendido de la bomba, se conecta un sensor digital de temperatura que utiliza el protocolo 1-Wire para comunicarse con la placa de Arduino, este realiza medición permanente de la temperatura en el interior de los biodigestores. Este sensor envía los datos a la tarjeta de Arduino que realiza la conversión análogo-digital para luego ser enviada a Raspberry Pi. Cuando la temperatura se encuentra por fuera del margen establecido, se enciende la bomba a través de relés y contactores.



**Figura XII.** Sensor de temperatura DS18B20

## VI. SINCRONIZACIÓN DEL GENERADOR A LA RED

El generador seleccionado para el aprovechamiento de la producción de biogás para su transformación en energía eléctrica es un generador monofásico de baja potencia, adecuado para la aplicación del proyecto. Este generador se acopla a un primotor de combustión de baja potencia que funciona con biogás. Para realizar sincronización del generador monofásico a la red, es necesario observar las condiciones que se requieren para lograr su acoplamiento sin riesgo de generar perturbaciones en su proceso. Estas condiciones son:

1. La f.e.m. del generador a conectar sea igual a la tensión de la red.
2. La polaridad del generador debe ser la misma que la polaridad de la red, es decir, se debe elegir la polaridad correspondiente para el instante de conexión del generador.
3. Las frecuencias del generador y de la red deben ser prácticamente iguales.
4. El orden de secuencia de la fase en los puntos que se conecta debe ser igual.

En el acuerdo CNO (Consejo Nacional de Operación) 1322, se presentan los requisitos generales de protecciones y márgenes operativos para la conexión de sistemas de generación en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) colombiano, de acuerdo con los niveles de tensión y los tipos de generación.

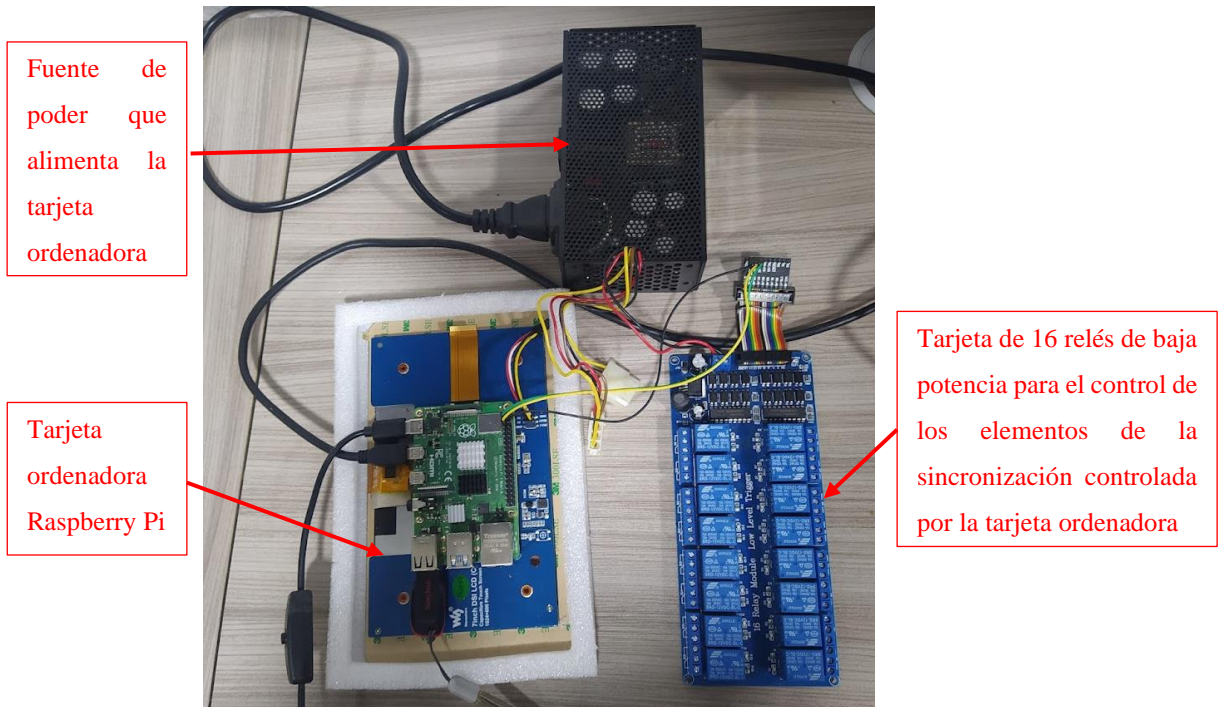
La CREG 030 de 2018 regula las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional, como es el caso de los proyectos a llevar a cabo en pequeños productores porcícolas.

Para el caso especial de la región antioqueña y parte del caribe, existe la norma especial para el sistema de distribución «conexión y operación de generadores y autogeneradores en el sistema de distribución local de EPM» RA9-001.

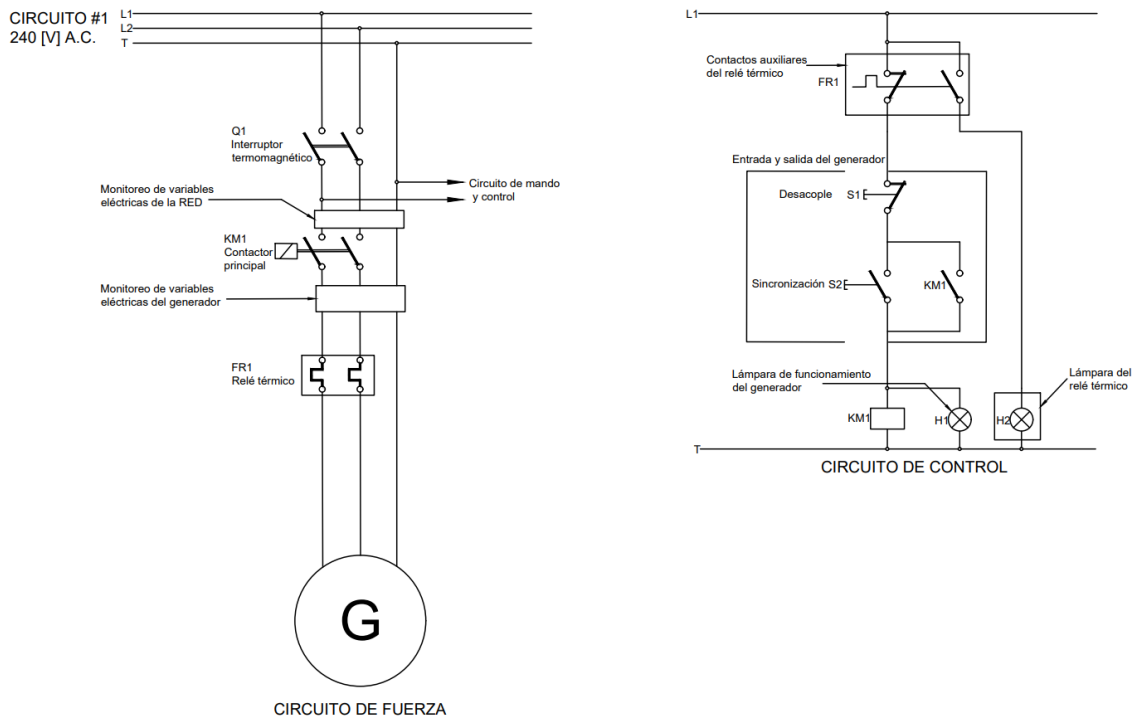
En general, para lograr la sincronización de la máquina, es necesario que el valor instantáneo de la tensión del generador tenga igual magnitud y fase que el valor instantáneo de la tensión de la red. Las condiciones anteriores apuntan a ese requisito.

### **Pasos para sincronizar el generador de 5 kVA a la red nacional**

1. Se realiza el acople común del neutro del generador con el neutro de la red.
2. Se enciende el primotor, y, a través del actuador (servomotor), se alcanza la velocidad de sincronismo y la frecuencia con valor de  $60 \pm 0.2$  Hz.
3. Se controla la corriente de excitación gradualmente hasta que el valor RMS de la tensión en los bornes del generador coincida con el valor RMS de la tensión de la red.
4. Cuando se hayan garantizado los pasos anteriores, se acciona el contactor que acopla la fase del generador con la de la red.



**Figura XIII.** Sistema de control y transferencia del generador. Como se muestra, el mando principal ocurre desde la tarjeta ordenadora que, a través del control de relés de baja potencia, controla el funcionamiento del servomotor (control de frecuencia y potencia activa) de la admisión de biogás a la cámara de combustión del motor de CI y el potenciómetro (control de magnitud del voltaje en bornes del generador y potencia reactiva) que controla la magnitud de la corriente de excitación en el devanado de campo del generador.



**Figura XIV.** Circuito de fuerza y control del generador eléctrico

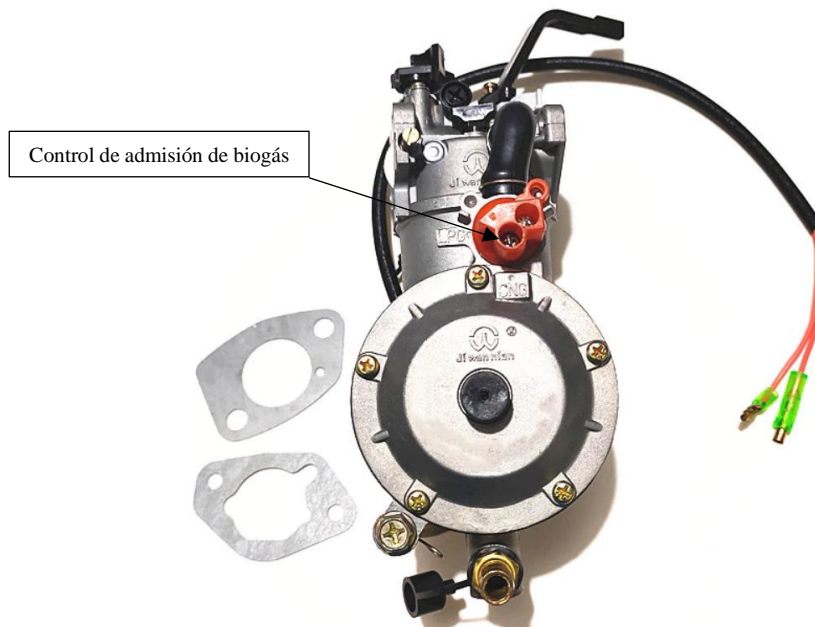
El generador posee protecciones por sobrecorrientes y sobretensiones. El interruptor termomagnético protege al generador contra sobrecorrientes peligrosas que puedan producir sobrecalentamiento excesivo y deterioro prematuro de los elementos que lo conforman; por otro lado, el relé térmico protege contra sobretensiones y desbalances de tensión. Ambos dispositivos se ajustaron de acuerdo con los requerimientos del sistema, como corriente máxima admisible por los conductores y el generador.

### Control de la magnitud de la f.e.m.

Para controlar la magnitud de la f.e.m., se varía la corriente de excitación del alternador. Esta variación se logra a través del Regulador Automático de Voltaje (AVR), que, para el alternador seleccionado, se hará a través del uso de Raspberri Pi. El regulador controla la corriente de excitación a través de un potenciómetro variable y, a través de un sistema de control realimentado programable, establece el valor de la magnitud de corriente que debe circular por la excitatriz para mantener la magnitud de la f.e.m. del generador lo más cercana posible, a la magnitud de la f.e.m. de la red. Esta es la etapa de regulación de tensión del generador síncrono.

### Control de la frecuencia

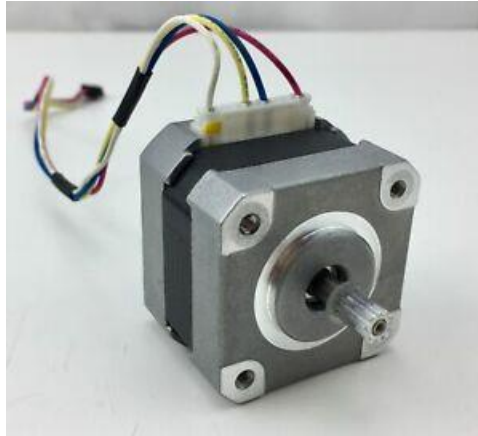
El motor varía su velocidad angular a partir del caudal de biogás de entrada, de este modo, es posible controlar la frecuencia de giro a partir de la admisión de biogás. Para lograr este propósito, se ajusta el tornillo que se muestra en la figura XII, apretando para disminuir el caudal y aflojando para disminuirlo.



**Figura XV.** Kit de conversión LPG para motor Honda GX390. Este kit permite reemplazar manualmente el tipo de combustible que alimentará el motor de CI, para este caso particular, el combustible es biogás.



El control de la apertura y cierre del tornillo de admisión de biogás se realiza a través de un servomotor controlado desde Raspberry Pi y Arduino. El servomotor permite rotar el tornillo de forma precisa y a una velocidad establecida. El servomotor seleccionado se gradúa a un paso de  $10^\circ$ , suficiente para causar cambios suaves en la frecuencia del motor. Esto permite regular la velocidad del primotor según se requiera, y, a su vez, controlar su frecuencia.



*Figura XVI. Servomotor ilustrativo que se emplea para controlar la apertura y cierre del tornillo de admisión de biogás.*

## VII. CONTROL E INSTRUMENTACIÓN DEL SISTEMA DE SINCRONIZACIÓN

Debido a la configuración del devanado del alternador, este entrega en sus bornes una tensión sinusoidal con magnitud y frecuencia variable, sin embargo, es necesario medir continuamente la magnitud de tensión, frecuencia y desfase de las ondas de voltaje del generador y la red para realizar la sincronización.

### Voltaje

Para medir la magnitud del voltaje, se emplean transformadores de voltaje (TP) que entregan la medida de forma continua a la placa de Arduino. El transformador de voltaje empleado para este propósito es el que se ilustra en la figura XV:



*Figura XVII. Transformador de corriente empleado*

El TP posee dos entradas y una salida análogas, una entrada es la que se conecta a los bornes del generador y de la red y la otra corresponde a la alimentación del amplificador operacional del dispositivo. Los valores finales corresponden a un vector de datos donde cada valor corresponde a la magnitud de tensión medida en un tiempo determinado. La salida entrega los resultados de la medición de la onda a la tarjeta de Arduino para ser procesadas. Con los valores medidos, es posible construir la onda de tensión en cada punto de conexión.

**Tabla I.** Características del transformador de corriente (TP). Este TP trabaja en el rango de operación del voltaje del sistema de distribución donde se encuentra la granja, por lo que es ideal para monitorear la medida para la sincronización del generador a la red.

<b>ESPECIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS</b>	
Rango de voltaje de alimentación del TP	5V – 30V DC
Voltaje de entrada máximo	250V AC
Voltaje alterno de salida máximo	5V AC
Señal de salida	Análoga senoidal
Dimensiones	51.7 mm X 21.6 mm
<b>TRANSFORMADOR</b>	
Modelo del producto	ZMPT101B
Corriente nominal de entrada y salida	2 mA
Ratio de entrada-salida	1000:1000
Voltaje de suministro	5 V DC
Diferencia de fase	<30° (a 50 Ω)
Rango lineal	0-3 mA (a 50 Ω)
Linealidad	1%
Precisión	0.2%
Aislamiento eléctrico entrada	Hasta 3000 V

## Frecuencia

La frecuencia se halla a partir de las mediciones dadas por el TP. Los datos del TP llegan a la placa de Arduino a través de conexión cableada, luego, Arduino procesa los datos y los convierte en un vector de datos que permiten crear la onda de tensión. Con los valores de la magnitud de tensión en función del tiempo, se establece qué tiempo tarda la onda construida en cruzar por cero tres veces. Este tiempo corresponde al periodo de la onda y su inverso es la frecuencia.

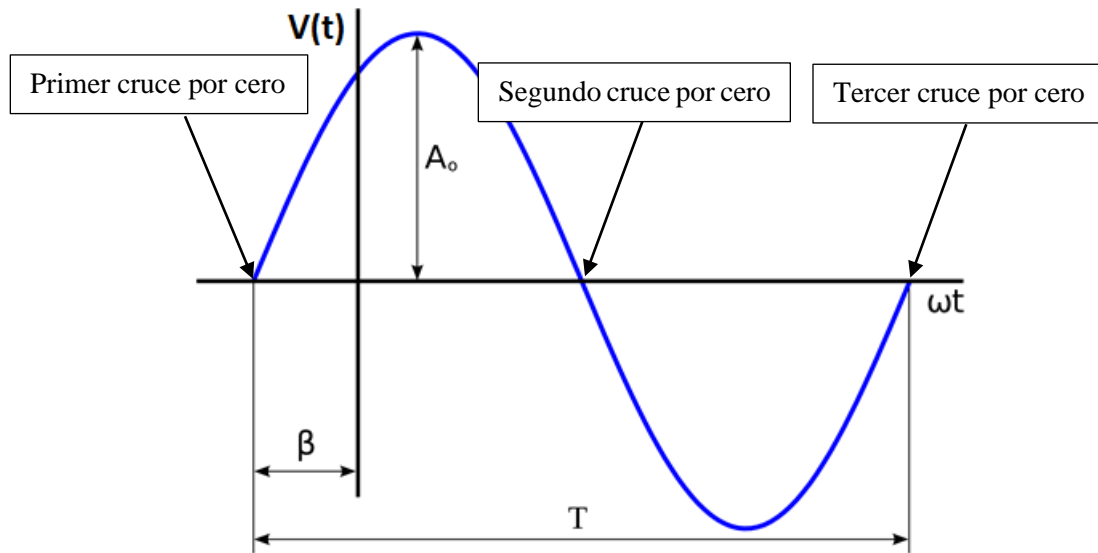


Figura XVIII. Forma de onda de tensión en los bornes del generador eléctrico

Tabla II. Datos de placa del motor GX390H2 - QXE. Información extraída de la ficha técnica del fabricante.

DATOS DE PLACA DEL MOTOR	
Referencia	GX390H2 – QXE
Fuente de energía	Biogás
Potencia	13@3600 rpm
Tipo de motor	OHV (motor cuatro tiempos, válvulas en culata)
Par máximo	26.5 Nm @2500 rpm
Tipo de arranque	12 V (Eléctrico y retráctil)
Capacidad tanque de combustible	6.1 L
Capacidad de aceite	1.1 L
Peso	31.7 kg
Dimensiones (Largo x Ancho x Alto cm)	40.6 X 46 X 44.8

Tabla III. Datos de placa del generador E1C10S F5.0. Información extraída de la ficha técnica del fabricante.

DATOS DE PLACA DEL GENERADOR	
Referencia	E1C10S F5.0
Fuente de energía	Electricidad
Tipo de sistema	Monofásico
Velocidad	3600 rpm
Frecuencia	60 Hz
Número de hilos	3 (2F + 1T)
Potencia nominal	5 kVA
Voltaje	120/240 VAC
Corriente	21/42 A
Factor de potencia	1
Eficiencia a máxima potencia	0.76
Tipo de acople	polea (B14)
Clase de aislamiento	tipo H

Excitación por capacitor	25 $\mu$ F@450VAC
Peso (kg)	33
Dimensiones (Largo x Ancho x Alto cm)	46.4 X 20 X 20

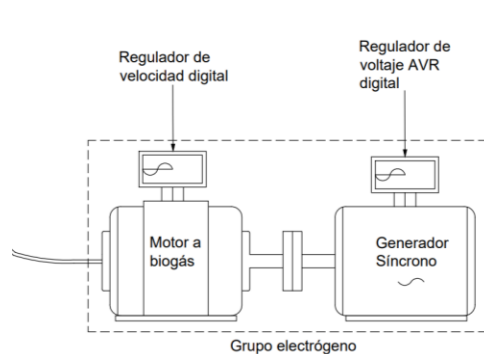
### Motor de combustión

Originalmente, el motor de combustión interna es un motor que funciona con gasolina, cuyo ciclo termodinámico es el ciclo Otto. Para desarrollar el biogás como combustible principal, se realizan varias modificaciones, principalmente, en el sistema de alimentación de combustible. Estas modificaciones se caracterizan por el empleo de tecnología sencilla y económica. Para este motor, se empleó un carburador manual adaptable de doble combustión que puede usar gas licuado o gas natural como combustible, sin cambiar la gasolina como combustible. Este carburador contiene el kit completo de conversión necesario para suministrar el biogás presurizado y con flujo constante para garantizar el adecuado funcionamiento del generador.

### Alternador monofásico

El principio de funcionamiento de un alternador monofásico consiste en hacer girar una espira dentro de un campo magnético para que se induzca en aquélla una fuerza electromotriz. Este proceso se logra a través del acople del eje del primotor (motor de combustión) al eje del generador. El generador posee una *excitatriz* que alimenta con corriente continua los electroimanes inductores. La corriente circula por los devanados inductores mediante el contacto deslizante formado por escobillas que rozan contra dos anillos conductores aislados del eje. La excitatriz consiste en un generador de corriente con excitación shunt, de modelo común, que permite variar la corriente de excitación del generador.

Esta variación permite modificar el valor RMS de la onda de tensión producida por el generador; cuando se encuentra en sincronía con la red, es posible controlar la potencia reactiva que la máquina suministra variando la corriente de excitación, mientras que el valor RMS de la onda de voltaje lo impone la red. Del mismo modo, controlar la frecuencia del alternador se logra a través de la variación de la velocidad del primotor acoplado a su eje. Cuando el alternador se encuentra en sincronía con la red, variar la velocidad del primotor se traducirá en controlar la potencia activa que el alternador suministra a la red, mientras que su frecuencia se mantiene constante.



**Figura XIX.** Grupo electrógeno empleado para propósitos de generación

Para controlar el valor RMS y la potencia reactiva que el generador suministra a la red, se regula la corriente que circula por el devanado de campo del generador a través de un potenciómetro variable que puede ser controlado con un servomotor, cuyo accionamiento a su vez es controlado usando Raspberry Pi y Arduino. En principio, luego de acoplar el generador a la red, se trabajará en condiciones nominales, por lo que no se controlará la inyección de potencia a la red.

## **VIII. ANÁLISIS DE INYECCIÓN DE ARMÓNICOS A LA RED POR PARTE DEL GENERADOR**

### **Armónicos de tensión y corriente**

Son corrientes y voltajes con frecuencias múltiplos de la fundamental de 60 Hz. Los armónicos son causados por la existencia de cargas/fuentes no lineales en la red. Una carga no lineal produce formas de onda no sinusoidales cuando es energizada con un voltaje sinusoidal. Las normas que rigen las condiciones básicas de instalación y uso del alternador seleccionado son: C22.2 N° 100-14 (R2009) Motors and Generators, UL1004-1 2° Ed. Rotating Electrical Machines – General Requirements, UL1004-4 2° Ed. Electric Generators. En estas normas se especifican los requerimientos a tener en cuenta en cuanto a aspectos de seguridad, manejo y calidad del suministro del fluido eléctrico por parte de la máquina. El alternador empleado en el proyecto se puede modelar como una carga conectada a un nodo del sistema, teniendo como diferencia la dirección del flujo de potencia, por lo tanto, el análisis de armónicos que esta puede inyectar a la red es el mismo que el de una carga conectada a un punto de acople común dado por el operador de red. La normatividad vigente en Colombia al respecto es la Resolución CREG 024 de 2005, la Guía IEEE 519-1992 y la norma ANSI/IEEE Standard C57.12.00-1987.

### **Armónicos de tensión (HDV) y corriente (THDi)**

La distorsión generada en la señal de voltaje es consecuencia directa del impacto sobre la red que causa la distorsión de corriente. La distorsión de la onda de corriente del alternador se debe principalmente a la distribución de la densidad de flujo del entrehierro de la máquina. Si la distribución del flujo en el entrehierro no fuera sinusoidal, entonces el voltaje de salida en bornes del generador tampoco lo será. Debido a la simetría del circuito magnético del alternador, este hace que se produzcan armónicos impares que deben suprimirse en la medida de lo posible. A pesar de los esfuerzos de los diseñadores de máquinas eléctricas rotativas para lograr distribuciones de flujo puramente sinusoidales, no ha sido posible lograrlo debido a las imperfecciones asociadas a los procedimientos de fábrica. Esta situación hace que todo generador de corriente alterna tenga en su salida de voltaje una componente sinusoidal más los armónicos.

La resolución CREG 024 de 2005 establece los límites máximos de la distorsión total de tensión, como se muestra en la tabla III:

**Tabla IV. Límites máximos de Distorsión Total de Tensión**

Tensión del sistema	THDV Máximo (%)
Niveles de tensión 1,2 y 3	5.0
Nivel de tensión 4	2.5
STN	1.5

Donde:

- El nivel de tensión 1 corresponde al nivel de tensión de un cliente, menor de 1 kV.
- El nivel de tensión 2 corresponde al nivel de tensión de un cliente, entre 1 kV y 30 kV.
- El nivel de tensión 3 corresponde al nivel de tensión de un cliente, entre 30 kV y 57.5 kV.
- El nivel de tensión 4 corresponde al nivel de tensión de un cliente de 115 kV.

El límite de distorsión armónica de tensión de la guía IEEE 519 determina lo siguiente: Establecer una limitación en el nivel de voltaje armónico que una compañía de distribución de electricidad puede suministrar a un consumidor.

La guía IEEE 519-1992, muestra los límites de corriente para componentes de armónicas individuales, así como también para la distorsión armónica total en función del tamaño de los clientes con respecto al sistema de distribución, (Límites en la Distorsión de Armónicos de la Corriente). El límite primario de los clientes individuales es la cantidad de corriente armónica que ellos pueden inyectar en la red de distribución. El tamaño relativo de la carga con respecto a la fuente se define como la relación de cortocircuito (SCR), al punto de acoplamiento común (PCC), que es donde la carga del consumidor se conecta con otras cargas en el sistema de potencia.

El tamaño del consumidor es definido por la corriente total de frecuencia fundamental en la carga,  $I_L$ , que incluye todas las cargas lineales y no lineales. El tamaño del sistema de abastecimiento es definido por el nivel de la corriente de cortocircuito, ISC, al PCC. Estas dos corrientes definen el SCR. Una relación alta significa que la carga es relativamente pequeña y que los límites aplicables no serán tan estrictos como los que corresponden cuando la relación es más baja. Tomando como referencia la corriente de corto del secundario del transformador que alimenta la granja del proyecto (37.5 kVA) y la máxima corriente nominal del proyecto, de acuerdo con los resultados de la tabla IV (22,3 A) se concluye que la relación SCR da por resultado 20.

Con esta relación se puede determinar la Distorsión Total de la demanda (TDD), teniendo en cuenta la tabla IV de la norma internacional IEEE 519-2014, para una relación SCR entre 20% y 50%, el límite recomendado de TDD es de 8%, y para los armónicos individuales de orden menor a 11, el límite es de 7%. Estos resultados se evidencian en la tabla IV.

**Tabla V.** Límites de distorsión armónica de corriente de rango de 120 V a 69 kV

Relación $I_{sc}/I_n$	Límites para componentes armónicos impares en % de $I_n$					Distorsión de demanda total en % (%TDD)
	Armónicos < 11	Armónicos 11 a 16	Armónicos 17 a 22	Armónicos 23 a 34	Armónicos > 34	
$I_{sc}/I_n < 20$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < I_{sc}/I_n < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < I_{sc}/I_n < 100$	10.0	4.0	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < I_{sc}/I_n < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
$I_{sc}/I_n > 1000$	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

De acuerdo con los resultados anteriores, para verificar que el alternador cumpla con estos requisitos, se instalará un analizador de redes en el tablero principal del proyecto cuando el generador se encuentre acoplado a la red para verificar la cantidad de armónicos que inyecta y poder garantizar que se encuentren en los márgenes recomendados.

## IX. DISEÑO DEL SISTEMA DE POTENCIA

El sistema de potencia del proyecto se conforma por un generador y cargas tales como iluminarias, bombas y equipos electrónicos y de control. El diseño del sistema parte de los requerimientos de los procesos para obtener un buen rendimiento en la producción de biogás, bajos costos de inversión, selección de equipos y elementos eléctricos acorde al tamaño de la planta, y seguridad del personal. Todos los elementos seleccionados pueden operar en las condiciones atmosféricas del lugar.

### Selección del generador

No se realizaron cálculos matemáticos para la selección del generador. El criterio de selección partió teniendo en cuenta la biodisponibilidad promedio de materia orgánica de un pequeño porcicultor, el tiempo de operación de la máquina, costo y mantenimiento de la máquina. Esta selección se hizo a partir de consideraciones empíricas, por lo que se llegó a la conclusión de que un generador con capacidad de 5 kVA es suficiente para aprovechar la producción promedio de biogás en plantas de pequeños porcicultores.

Partiendo de los criterios anteriores, se seleccionó el motor de combustión interna (CI) y el alternador que se acoplará a su eje. Las placas características son las dadas en las tablas I y II.

### **Selección de la bomba de llenado, recirculación y vaciado**

La bomba que operará en los modos de llenado, recirculación y vaciado fue seleccionada partiendo de los caudales requeridos y el tiempo de operación en cada modo. También se tuvo en cuenta los márgenes de seguridad para que la máquina opere en condiciones que no pongan en riesgo su vida útil, tales como consideraciones que se deben tener en cuenta para evitar fenómenos de cavitación, sobrecalentamiento del devanado, sobrepicos de voltaje peligrosos, etc. Por lo tanto, la electrobomba seleccionada tiene una potencia de 2 HP (1,47 kW) y funciona con una tensión de 220 V. El equipo puede trabajar con sólidos en suspensión de hasta 6 mm de espesor, ideal para trabajar con el recurso orgánico empleado en proyectos de biomasa.

### **Selección de bomba del sistema de calentamiento de la materia orgánica**

La bomba que operará en este sistema requiere de la capacidad de manejar bajo caudal y tolerar temperaturas del fluido de hasta 80°C, ya que corresponde al valor de temperatura máximo que puede alcanzar el agua en el colector solar, considerando las condiciones atmosféricas del lugar donde se implementó el proyecto. La bomba seleccionada tiene una potencia de 1/6 HP (123 W) y cumple con los requerimientos anteriores, sin embargo, maneja altas presiones, por lo que fue necesario implementar una válvula reguladora de presión, ya que el colector solar seleccionado no puede trabajar con altas presiones.

### **Selección de iluminaria**

La iluminación de casa de máquinas y del perímetro donde se encuentra el proyecto, fue seleccionada a partir de consideraciones empíricas, de modo que se seleccionó una bombilla LED de 15 W para casa de máquinas y un reflector de 50 W para el perímetro donde se encuentra el proyecto. Ambas iluminarias proporcionan la luz necesaria para obtener una correcta iluminación del sitio. No se realizaron cálculos de iluminación para ello, solo se evaluó empíricamente la visibilidad en horas de la noche cuando el reflector está encendido.

### **Levantamiento de planos eléctricos del proyecto**

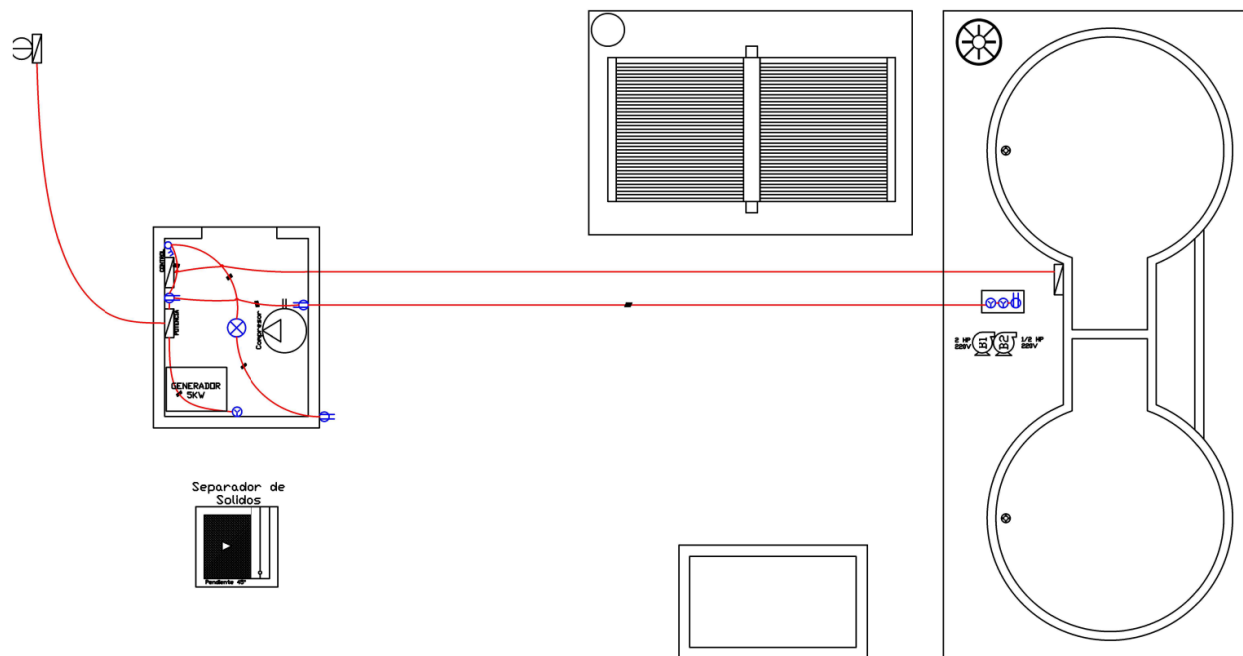
Para alimentar las cargas que conforman el proyecto y transportar la potencia generada, es necesario realizar el dimensionamiento del cableado y las tuberías que se requieren en el proyecto. Este trabajo requiere que se cumpla la normativa colombiana dada en el RETIE y la NTC 2050, que garantiza la seguridad de las instalaciones. En la tabla VI se muestran los resultados de los cálculos de cableado, protecciones y tubería empleada para cada circuito del proyecto. De acuerdo con los cálculos realizados, se llega a que la corriente total demandada es de 4.93 A, la protección principal es 2x40 A, y el alimentador eléctrico tiene un calibre N°8 trifilar.



**Tabla VI.** Cálculos de cableado, protecciones y tubería empleada para cada circuito del proyecto.

Número de circuito	Descripción	Carga por fase [kVA]		Protección eléctrica		Tensión [V]	Cu /Al	Corriente [A]	Distancia tablero [m]	Cable AWG THHN/THWN			Caída de tensión	Pérdidas en potencia [W]	Ducto mínimo PVC/IMC	Porcentaje de ocupación
		L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	Polos	Amp					F	N	T				
1	Generador a biogás	2,75		2	15	240	Cu	11,5	2,18	12	-	12	0,03%	0,94	Ø 1/2 " IMC	12,30%
			2,75													
2	Nariz electrónica	0,2		1	15	120	Cu	1,67	1	12	12	12	0,01%	0,014	Ø 1/2 " IMC	15,67%
3	Bomba 2 HP		1,49 14	2	15	220	Cu	6,78	12	12	-	12	0,19%	2,873	Ø 1/2 " IMC	10,45%
4	Bomba sumergible 500 W		0,37 3	1	15	110	Cu	3,391	12	12	12	12	0,19%	0,719	Ø 1/2 " IMC	15,67%
5	Sistemas auxiliares + bomba 1/6 HP	0,43 2		1	20	120	Cu	3,60	10	12	12	12	0,16%	0,675	Ø 1/2 " IMC y PVC	15,67%
6	Sistema de transferencia		0,2	1	15	120	Cu	1,67	1	12	12	12	0,01%	0,014	Ø 1/2 " IMC	15,67%
7	Compresor	2,23 71		1	20	120	Cu	18,64	5	12	12	12	0,41%	9,053	Ø 1/2 " IMC	15,67%

El diagrama unifilar es el siguiente:



**Ilustración I.** Diagrama unifilar del proyecto

## X. ANÁLISIS DE COSTO-BENEFICIO DEL PROYECTO DE GENERACIÓN CON BIOGÁS PARA PEQUEÑAS GRANJAS PORCÍCOLAS

La generación de energía eléctrica a partir del aprovechamiento de subproductos orgánicos no solo produce importantes beneficios socio-ambientales, sino que también produce beneficios económicos para los pequeños productores porcícolas. A continuación, se establecen los pasos para realizar el análisis costo-beneficio:

**Formulación de objetivos y metas del proyecto:** El proyecto busca diferentes objetivos, los cuales se resumen en la democratización de la energía, el cuidado de la salud y el medio ambiente. Estos propósitos se buscan alcanzar a través del uso de tecnología apropiada, materiales a bajo costo y fácilmente accesibles. También se busca que la operatividad del proyecto sea lo más entendible y sencilla posible, de modo que cualquier pequeño porcicultor requiera de poca intervención de personal calificado cuando sea necesario.

**Requerimientos y limitaciones:** El biodigestor es el corazón del proyecto. Un biodigestor funcionando en condiciones óptimas garantiza mayor productividad de biogás y bioabono para la producción de fertilizantes. Es el elemento más costoso de todo el proyecto, puesto que requiere de mucho cuidado para su fabricación, ya que es el hogar del ecosistema bacteriano que se encarga de la biotransformación energética. El biodigestor requiere de análisis estructurales y su fabricación se recomienda según [6], ser construido en el final de una pendiente para el aprovechamiento de la energía potencial para alimentar los tanques con materia orgánica. También se requiere garantizar que este se encuentre sellado herméticamente, evitando el ingreso de aire o oxígeno que pueda perturbar la producción de biogás. Es el elemento más complejo de todos, puesto que su operación y mantenimiento requieren un trabajo especial.

El proyecto requiere de inspección continua, ya que aún no se ha desarrollado la tecnología necesaria para dar mayor autonomía a los procesos de producción. Esta situación hace que se necesite que el operador de la planta vigile continuamente y realice el control necesario, ya que cualquier descuido podría causar una falla en la producción.

**Relación costo – beneficio:** Para realizar este análisis, se debe tener presente que se busca, paralelamente al aprovechamiento eficiente de los residuos orgánicos, generar ingresos económicos adicionales. Estos ingresos pueden asumir los costos de implementación del proyecto y, luego de esto, disminuir los costos asociados a las labores de porcicultura.

El costo total del proyecto de investigación es de \$ 129'192.696, en donde \$ 77'736. 696 (60 %) es recurso en efectivo (fresco) que se requiere financiar y \$ 51'456.000 es recurso en especie, específicamente recurso humano (ver tabla 7).

*Tabla VII. Resumen del presupuesto.*

Rubro	Recurso fresco (\$)	Recurso en especie (\$)
Recurso humano (FMVZ UCES, Porkcolombia y GSV ingeniería)		\$ 51'456.000
Construcción (con base al prediseño)	\$ 47'185.196	
Equipos de monitoreo: pH metros digitales, termómetros digitales, temporizadores para las bombas, medidores de metano y sulfuro de hidrógeno, medidor de energía eléctrica digital y un sistema de reporte de la información en tiempo real.	\$ 14'808.871	
Pruebas de laboratorio	\$ 11'303.868	
<b>Total rubros</b>	\$ 73'297.935	\$ 51'456.000
<b>Total del proyecto</b>	\$ 129'192.696	

En la tabla V, se detalla el recurso humano, en la tabla VI se detalla el presupuesto de construcción de la infraestructura del modelo y en la tabla VII se detallan las pruebas de laboratorio.

*Tabla VIII. Recurso humano.*

Investigador	Horas totales	Costo hora (\$)	Total (\$)
FMVZ UCES (MsC)	96	151.000	14'496.000
FMVZ UCES (Ing)	96	78.000	7'488.000
Porkcolombia (MsC)	96	151.000	14'496.000
Porkcolombia (ing)	96	78.000	7'488.000
GSV ingeniería (Ing)	96	78.000	7'488.000
<b>Total</b>			51'456.000

*Tabla IX. Detalles constructivos y presupuesto.*

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT	RE	P.U	VALOR
<b>MANO DE A OBRA</b>						
	INGENIERO ELECTRICISTA	DIA	5		\$ 157.246	\$ 786.228

INGENIERO MECANICO	DIA	5	1	\$ 157.246	\$ 786.228
TECNICO 1	DIA	5	1	\$ 75.478	\$ 377.390
TECNICO 2	DIA	5	1	\$ 75.478	\$ 377.390
TRAMITES LEGALIZACION ANTE OR	UN	1	1	\$ 650.000	\$ 650.000
TRAMITES LEY 1715	UN	1	1	\$ 550.000	\$ 550.000
CERTIFICACION RETIE	UN	1	1	\$ 1.800.000	\$ 1.800.000
ESCAVACIONES	M3	40	1	\$ 69.188	\$ 691.881
CUADRILLA CIVIL (3 PERSONAS)	DIA	5	1	\$ 245.303	\$ 1.226.516

**HERRAMIENTA**

MANO	UN	10	1	\$ 10.000	\$ 100.000
------	----	----	---	-----------	------------

**MATERIALES**

TANQUE 40.000 L TIPO LAGUNA	UN	1	1	\$ 7.000.000	\$ 14.000.000
MEMBRANA EPDM	M2	80	1	\$ 32.000	\$ 2.560.000
ESTRUCTURA EN INOX	UN	1	1	\$ 1.500.000	\$ 1.500.000
BOMBAS	UN	1	1	\$ 1.500.000	\$ 1.500.000
TUBERIAS 2"X 6 M	UN	10	1	\$ 50.000	\$ 500.000
ACCESORIOS TUBERIA	GL	1	1	\$ 500.000	\$ 500.000
RESERVORIO BIOGAS 10 M3 PVC	UN	1	1	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
MOTOGENERADOR 3KW GASOLINA/GLP CONVERTIDO	UN	1	1	\$ 3.500.000	\$ 3.500.000

SISTEMA DE FILTRACION DEL BIOGAS	UN	1	1	\$ 750.000	\$ 750.000
COMPRESOR DE AIRE 2.5hp Tan 50lt 200 Lt/min	UN	1	1	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
RECTIFICADOR 2 KW	UN	1	1	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
INVERSOR 2Kw	UN	1	1	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000
CABLEADO	M	50	1	\$ 5.000	\$ 250.000
PROTECCIONES ELECTRICAS	UN	1	1	\$ 100.000	\$ 100.000
ACCESORIOS ESTRUCTURA	GL	1	1	\$ 200.000	\$ 200.000
CONTADOR BIDIRECCIONAL	UN	1	1	\$ 750.000	\$ 750.000
DUCTOS	UN	1	1	\$ 90.000	\$ 90.000
GABINETE ELECTRICO Y SPT	GL	1	1	\$ 550.000	\$ 550.000
CUARTO DE MAQUINAS	GL	1	1	\$ 1.500.000	\$ 1.500.000

**VIATICOS**

TRANSPORTE y VIATICOS	GL	1	1	\$ 2.300.000	\$ 2.300.000
-----------------------	----	---	---	--------------	--------------

<b>COSTOS DIRECTOS</b>		\$ 42.895.633
<b>ADMIN</b>	7%	\$ 3.002.694
<b>INPREVISTOS</b>	3%	\$ 1.286.869
<b>MARGEN</b>	0%	\$ 0
<b>SUBTOTAL</b>		\$ 47.185.196

*Tabla X. Presupuesto de las pruebas de laboratorio.*

Laboratorio	Costo (\$)
Laboratorio Giem de la Universidad de Antioquia	8'797.920
Acuazul Ltda	2'505.948
<b>Total</b>	<b>11'303.868</b>

El flujo de caja se realizó teniendo en cuenta el consumo de energía eléctrica por año de la granja donde se encuentra ubicado el proyecto, teniendo en cuenta el aumento del precio del kWh cada año, hasta un periodo de 15 años. Teniendo en cuenta, también, la biodisponibilidad de residuo orgánico y la capacidad de generación del proyecto, se estima el costo del kWh debido a la generación. A continuación, se ilustra el flujo de caja que permite estimar los costos monetarios relacionados con lo anterior, el valor de la cuota anual, mensual, el VPN (Valor Presente Neto), la TIR (Tasa Interna de Retorno), y el PBT (Ganancia antes de impuestos), que genera el proyecto:



## XI. ANÁLISIS

La producción de energía eléctrica a partir del biogás basado en pequeñas granjas porcícolas tiene un enfoque multipropósito que puede suplir necesidades elementales en las granjas tales como suministro del servicio de energía eléctrica, calefacción, producción de fertilizantes para los cultivos y una gestión adecuada de los residuos orgánicos. Los biodigestores construidos para este proyecto facilitan la operación y mantenimiento a nivel de pequeñas granjas porcícolas, puesto que el diseño estructural de estos evita inconvenientes como la dificultad de acceder al volumen interno, el vaciado del contenido, etc. Por otro lado, el circuito eléctrico del proyecto no es complejo y se ajusta al tipo nivel residencial, ya que no se manejan equipos complejos que requieran conexiones especiales, esto hace que se disminuya la dependencia de la intervención de personal calificado en caso de presentarse alguna falla. La electrobomba empleada puede realizar diferentes operaciones y en cada una de ellas ofrece el servicio esperado, esto hace que se reduzcan los costos de implementación para cada tipo de servicio, además, es una electrobomba que se puede encontrar fácilmente en el mercado y que su operación y mantenimiento es bien conocido por la mayoría de los pequeños porcicultores. Para la etapa de generación de energía eléctrica, se tiene que el motor de combustión interna (CI), es un motor pequeño de fácil manipulación, que no requiere de mantenimiento especial y cuyas partes que lo conforman (repuestos) son fáciles de conseguir en cualquier taller mecánico. También, los problemas que este puede presentar son fáciles de solucionar por personal técnico que trabaja con motores de combustión de motos y carros. Para el generador, este también puede ser tratado en muchos talleres eléctricos y sus daños más comunes son fáciles de identificar. Sin embargo, para el sistema de control y transferencia, debido a la existencia de elementos electrónicos, se requiere de un mantenimiento especial, ya que son equipos poco comunes. Para este caso especial, la empresa GSV Ingeniería prestará tales servicios, en caso de presentarse inconvenientes en esta parte del sistema.

Esta alternativa mostró ser viable para su implementación en pequeñas granjas porcícolas. Su desarrollo y mejora hará que productores que se encuentren en regiones remotas del territorio colombiano puedan acceder a un recurso elemental, de buena calidad, que no depende de condiciones ambientales adversas, a diferencia de otros sistemas de generación. Por otro lado, pueden mejorar la eficiencia de los sistemas de producción agrícola, ya que al aprovechar el biofertilizante extraído de los biodigestores, reducen la dependencia del consumo de fertilizantes



del mercado. También, el biodigestor ha demostrado ser eficaz en el tratamiento seguro de residuos, ya que elimina los inconvenientes presentados por malos olores, enfermedades, contaminación del suelo y manantiales naturales.

El monitoreo de los parámetros que rigen la producción de biogás en los biodigestores a través de sensores, llevando así las variables químicas a variables eléctricas, ha demostrado ser efectivo y aplicable a cualquier planta de biogás.

## **XII. CONCLUSIONES**

A pesar de las grandes ventajas de la generación de energía eléctrica a partir del biogás, aún persisten inconvenientes con la etapa de conversión de la energía química contenida en el biogás en energía eléctrica. Estos inconvenientes se deben a la baja eficiencia de los sistemas termodinámicos, por lo tanto, se propone evaluar nuevos sistemas de conversión de biogás a electricidad empleando motores de CI cuya eficiencia sea lo más alta posible. Dado que el generador no estará operando continuamente, cuando haya exceso de producción de biogás, este se puede almacenar para generar electricidad en los momentos en que el porcicultor lo requiera. Esto representa una gran ventaja, ya que se tiene disponibilidad del fluido eléctrico en cualquier época y hora y los costos de su producción son prácticamente constantes. El porcicultor tiene la alternativa de emplear el biogás para generar electricidad y cubrir su demanda o exportar la electricidad a la red y recibir incentivos económicos.

La factibilidad y viabilidad económica de las plantas de biogás cobra sentido si se pueden emplear para suministro local y de exportación a la red.

Para aumentar la eficiencia de la planta, se puede aprovechar el calor generado por el motor de CI, por lo que convendría un sistema de cogeneración.

El efecto del saneamiento debido a la reducción de la demanda química y biológica de oxígeno (DQO y DBO), tiene un impacto positivo en la gestión ambiental y el control de la contaminación por la producción agropecuaria. Del mismo modo, la aplicación del digestato (estiércol líquido que sale de los biodigestores) como fertilizante agrícola, mejorará la productividad de la agricultura y aumentará los ingresos de los porcicultores.

La múltiple aplicación del biogás hace que porcicultores puedan invertir en la generación de electricidad, creando así una agricultura más rentable y sostenible.

### XIII. REFERENCIAS

- [1] Chen, B., Hayat, T. and Alsaedi, A. Biogas systems in China. Berlin: Springer. DFID (2002). Energy for the poor. Retrieved from, <http://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/bs/JEPP/energyforthe poor.pdf>.
- [2] L. Condrachi, E. Ceanga, L. P. Georgescu, G. Murariu, R. Vilanova and M. Barbu, "Model-Based Optimization of an Anaerobic Digestion Process," 2018 22nd International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2018, pp. 231-236, doi: 10.1109/ICSTCC.2018.8540673.
- [3] Wiegant, W.M., Classen, J.A. and Lettinga, G. (1985). Thermophilic anaerobic digestion of high strength wastewaters. *Biotechnology and Bioengineering* 27, 1374–1381.
- [4] Bond, T. & Michael. (2011). Biogas. *Templeton Energy for sustainable Development*, 15 (4) 4 pp 347-354 .2011.
- [5] Vargas Federico. (1990). Máquinas eléctricas rotativas.
- [6] Gobierno de Chile, ministerio de Energía. (2011). Manual de biogás.

**XIV. ANEXO A. FOTOS DEL PROYECTO CES**

**A.1. Vista panorámica del proyecto**



**A.2. Vista panorámica del proyecto**



**A.3. Instalación del colector solar**



**A.4. Biodigestor con domo de concreto**



**A.5. Casa de máquinas**



**A.6. Sistema de válvulas**



**A.7. Biodigestores; biodigestor con domo de concreto y biodigestor con domo de membrana plástica (aún no instalada), bomba de recirculación/llenado/vaciado**

