



DISEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE RESIDUOS DE GANADO PORCINO

ANDRES FELIPE VELASQUEZ DOMINGUEZ

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Buga, Colombia
2020

Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica a partir de residuos de ganado porcino

Andres Felipe Velasquez Dominguez

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero electromecánico

Director (a):
Ing. Adriana López Vargas, MSc.

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Buga, Colombia
2020

DEDICATORIA

El presente trabajo, se logró principalmente gracias al apoyo incondicional de Dios, a mi familia y a cada uno de los docentes que hicieron parte de mi etapa formativa, para poder desarrollar con éxito este trabajo.

ANDRES FELIPE VELASQUEZ DOMINGUEZ

Agradecimientos

Principalmente, a los docentes de mi carrera formativa que jugaron un papel vital para el desarrollo de esta importante etapa de mi vida. Agradezco el apoyo de mi familia que con su apoyo incondicional me ayudaron a enfrentar cada uno de los desafíos a los cuales me enfrente en esta importante etapa, a la granja El Recreo por permitirme realizar la investigación y toma de datos de su proceso y finalmente a la universidad Antonio Nariño por abrirnos las puertas del conocimiento. A todas infinitas gracias.

ANDRES FELIPE VELASQUEZ DOMINGUEZ

Resumen

En este proyecto se presenta una propuesta para el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos de los porcinos de la granja El Recreo, ubicada en las inmediaciones del municipio de Guadalajara de Buga. Se planteó un proceso sinérgico entre manejo eficiente de residuos, generación de energía y reducción de costos operacionales de la granja, mediante la implementación de un sistema de bajo costo de producción de biogás y generación de potencia. Para esto, se visitó la granja para chequear la topología del terreno, y determinar el número de animales y su etapa productiva. Con esta información se calculó el potencial energético de los residuos, se diseñaron los sistemas auxiliares para la purificación del biogás, y se seleccionó el generador de potencia y los componentes eléctricos. Se usaron tuberías y accesorios de PVC de 3/8" por su bajo costo y resistencia a la corrosión. El diseño de la trampa de condensados, el filtro de H₂S y el sistema de absorción de CO₂, se realizó pensando en la baja complejidad y reducción de costos de instalación. La planta de generación de potencia seleccionada (Puxin) permite una generación continua de potencia de 1200 W por 4 horas. Esto representa un ahorro mensual de \$77.094 pesos para la granja. Se diseñó un sistema eléctrico basado en una transferencia manual que es la que selecciona si el circuito eléctrico opera con la red general o con la planta de generación. Finalmente se realizó un análisis económico del sistema.

Palabras clave: Biogás, granja porcina, generación eléctrica, energía renovable Colombia.

Abstract

In this Project is presented a proposal for the use energy of organic waste of the farm's pigs "El Recreo" located in the vicinity of the municipality of Guadalajara de Buga. It was proposed synergistic between efficient handling of waste, power generation and reduction of operational costs of the farm, through the implementation of a low-cost system of biogas production and power generation, in order to check the topography of the land, and determine the number of animals and its productive stage a visit to the farm was made. With the information obtained, it was possible to calculate the energy potential of waste, were designed the auxiliary systems for the purification of biogas, and selected the power generator and electrical components. The materials were 3,8" PVC pipes and fittings for its low cost and resistance to corrosion. The condensate trap design, the H₂S filter, and the CO₂ absorption system, in this Project was made thinking about low complexity and reduction of installation costs the selected power generation plant () allows a continuous generation of power from 1200W for 4 hours. This represents a monthly saving of \$ \$ 77.094 pesos to the farm. An electrical system based on a manual transfer was designed, which is the one that selects whether the electrical circuit operates with the general network or with the generation plant. Finally, an economic analysis of the system.

Keywords: Biogas, Pig farm, electricity generation, renewable energy Colombia.

Tabla de Contenido

Lista de Ilustraciones	9
Lista de Tablas.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
1. Contexto general	13
1.1 Descripción del Problema.....	13
1.2 Justificación.....	14
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo general	14
1.3.2 Objetivos específicos.....	14
2. Marco teórico	16
2.1 Caracterización de la granja	16
2.1.1 Ubicación geográfica	17
2.1.2 Clima	17
2.1.3 Tipos de cerdos en granja	17
2.1.4 Potencial energético de la granja	19
2.1.5 Capacidad de generación de biogás.....	19
2.1.6 Poder calorífico.....	20
2.2 Biodigestión.....	20
2.2.1 Digestión anaeróbica	20
2.3 Factores determinantes en la generación de biogás	21
2.3.1 Composición de la materia orgánica	22
2.3.2 Temperatura	22
2.3.3 Tiempo de retención hidráulica (THR)	23
2.3.4 Contenido de agua	23
2.3.5 Nivel de pH.....	24
2.4 Selección de biodigestor	24
2.4.1 Tipos de biodigestores.....	24
2.5 Dimensionamiento del digestor	27
2.5.1 Calculo del volumen de la mezcla agua- estiércol.....	27
2.5.2 Dimensionamiento del digestor.....	28
2.6 Tuberías y accesorios	28
2.6.1 Dimensionamiento de tuberías y accesorios.....	28
2.6.2 Materiales para tuberías y accesorios.....	29
2.7 Acondicionamiento del biogás	29
2.7.1 Secado del biogás	30
2.7.2 Desulfuración.....	31
2.7.3 Absorción de CO ₂	32
2.8 Generación de potencia	33
2.8.1 Motor de combustión interna.....	34
2.8.2 Turbina de gas.....	35
2.8.3 Micro turbina.....	35
2.9 Diseño de sistema eléctrico.....	36

2.9.1	Calculo de caída de tensión de conductores.....	36
2.9.2	Calculo de interruptores de corriente	38
2.10	Análisis económico.....	38
2.10.1	Valor presente neto (VPN).....	39
3.	Caracterización de la granja	40
3.1	Granja El Recreo.....	40
4	Desarrollo.....	44
4.1	Cálculo del potencial energético de la planta.....	44
4.2	Calculo del biodigestor	44
4.3	Selección del material para el biodigestor	45
4.4	Calculo de pérdidas en red de transporte de biogás.....	47
4.5	Selección componentes de purificación del biogás	50
4.5.1	Trampa de agua	50
4.5.2	Filtro de H ₂ S	51
4.5.3	Absorción de CO ₂	52
4.6	Cálculo de generación de energía eléctrica.....	53
4.7	Sistema eléctrico.....	57
4.7.1	Selección de ubicación de planta de potencia	58
4.7.2	Interruptores de protección	58
4.7.3	Caracterización de conductores.....	59
4.7.4	Calculo de conductores por caída de voltaje.....	61
4.7.5	Diagrama eléctrico.....	61
4.8	Análisis económico del sistema.....	62
4.8.1	Caracterización de costos del sistema.....	63
4.8.2	Valor presente neto (VPN).....	64
4.8.3	Tasa interna de retorno.....	65
5:	Conclusiones y recomendaciones	66
5.1	Conclusiones.....	66
5.2	Recomendaciones	68
Bibliografía.....	69

Lista de Figuras

Figura 2-1. Etapas de la digestión anaeróbica.....	21
Figura 2-2. Biodigestor tipo batch.....	24
Figura 2-3. Biodigestor tubular.....	25
Figura 2-4. Biodigestor chino.....	26
Figura 2-6. Caja seca con viruta de hierro para desulfuración.....	31
Figura 2-7. Movimiento reciprocante en motor de combustión interna.....	33
Figura 2-8. Partes de una turbina.....	34
Figura 2-9. Micro turbina a gas.....	35
Figura 3-1. Granja El Recreo.....	40
Figura 3-2. Tanque de almacenamiento de estiércol vista lateral.....	41
Figura 3-3. Tanque de almacenamiento de estiércol vista frontal.....	41
Figura 3-4. Salida de tanque de almacenamiento.....	42
Figura 4-1. Ubicación de la planta de potencia.....	46
Figura 4-2. Distribución de planta de potencia.....	46
Figura 4-3. Trampa de agua.....	49
Figura 4-4. Filtro de H_2S	50
Figura 4-5. Sistema de absorción de CO_2	51
Figura 4-6. Generador eléctrico Puxin.....	53
Figura 4-7. Distribución de planta de potencia.....	55
Figura 4-8. Caracterización de luminarias.....	59
Figura 4-9 Diagrama eléctrico del sistema.....	61

Lista de Tablas

Tabla 2-1. Tasa de producción de estiércol	17
Tabla 2-2. Grupos bacterianos en función de la temperatura	22
Tabla 2-3. Tiempo de retención hidráulico	22
Tabla 2-4. Resistencia de materiales conductores	36
Tabla 2-5. Equivalencia de conductores en mm^2	36
Tabla 3-1. Población animal por etapa productiva y peso promedio	43
Tabla 4-1. Propiedades físico-mecánicas de la geo membrana de polietileno.....	45
Tabla 4-2. Perdida de presión del sistema de tubería y accesorios de 3/8"	47
Tabla 4-3. Perdida de presión del sistema de tubería y accesorios de 1/2"	48
Tabla 4-4. Perdida de presión del sistema de tubería y accesorios de 3/4"	48
Tabla 4-5. Generadores eléctricos a gas cotizados.....	52
Tabla 4-6. Caracterización del consumo eléctrico en la granja El Recreo	54
Tabla 4-7. Caracterización de potencias del sistema de generación	57
Tabla 4-8. Color de conductores	57
Tabla 4-9. Costos sistema eléctrico	62
Tabla 4-10. Costos sistema de biodigestion	62
Tabla 4-11. Costo total.....	63
Tabla 4-12. Calculo de valor presente neto (VPN).....	63
Tabla 4-13. Calculo de la tasa interna de retorno	64

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la humanidad se enfrenta a uno de sus mayores desafíos ante los efectos del cambio climático; según informes de la Organización de Naciones Unidas (ONU) existen pruebas de que se han alcanzado o sobrepasado varios puntos de inflexión que darían lugar a cambios irreversibles en importantes ecosistemas, como el marítimo, la selva amazónica y la tundra antártica, también, de no desarrollar cambios drásticos en la emisión de CO₂ o Gases de Efecto Invernadero (GEI), se perderían hasta en un 99% los arrecifes coralinos y con ellos la vida marina que los rodea; de igual forma, se plantea que con el daño ocasionado por el estilo de vida humana, aunque se disminuyan drásticamente las emisiones de GEI, el cambio climático seguirá desarrollándose de manera negativa durante siglos (Naciones Unidas, 2019).

El aumento excesivo de las concentraciones de los GEI es la principal causa del cambio climático, este aumento se debe a que las actividades como la agricultura, el transporte, producción de energía y procesos industriales son la mayor fuente de emisiones de dichos gases. Según un informe sobre la brecha de emisiones en 2019 de la ONU, si solo confiamos en los compromisos pactados en el acuerdo de París y no se toman medidas de acción, es muy probable que las temperaturas aumenten 3,2 °C para finales de este siglo, lo que crea la necesidad de acortar esa brecha entre lo que actualmente estamos haciendo y lo que debemos hacer para prevenir los efectos más graves del cambio climático. Las economías deben tomar el camino de la des carbonización; un informe de la agencia internacional de energía (Barrero, 2019) asegura que en los últimos años la utilización de combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural siguen dominando la demanda de energía con una participación de alrededor del 80% en el año 2017. Por estos motivos, se crea la necesidad en incursionar en técnicas de generación a partir de energía

renovables o también llamadas energías alternativas que son energías derivadas de los recursos naturales que son repuestos a una tasa mayor a la que son consumidas. Las fuentes de energía renovable más comunes son: la eólica, la solar y el biogás. El biogás como energía renovable, tiene gran relevancia en este aspecto debido a que ayuda a mitigar los problemas energéticos y a reducir los impactos ambientales generados por las actividades humanas como la agricultura que es una de las mayores fuentes de emisiones de GEI, porque este aprovecha los residuos orgánicos de origen natural y vegetal, a los que si no se le da un debido tratamiento generan contaminación (IDAE, 2017).

El objetivo de esta investigación es diseñar un sistema de generación de energía eléctrica a partir de biogás utilizando los residuos orgánicos de una granja productora de ganado porcino, para así dar un tratamiento de los residuos producidos y minimizar la contaminación. Con base en estudios realizados por estudiantes universitarios en ingeniería a nivel de pregrado y maestría de varias universidades como la Universidad Técnica de Cotopaxi (Ecuador), Universidad Autónoma de Querétaro - México y Chiapas – Escuela politécnica nacional – Quito (Ecuador), Universidad de Piura y Jaén – Perú, Universidad de Earth – Costa rica y la universidad libre – Colombia; donde diseñaron sistemas de generación de energía térmica con residuos agrícolas y sistemas de purificación de biogás, para efectos de la actual investigación, se diseña el sistema de generación de energía y distribución bajo las normas del reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE); por lo que se debe realizar el estudio de la cantidad de biogás producido por los desechos de la granja, dimensionar los elementos de almacenamiento, transporte, purificación del sistema; como también, realizar un estudio del consumo eléctrico de la granja para establecer la potencia requerida para abastecer el proceso. De la misma manera, determinar el tamaño del elemento motor necesario para la generación de energía eléctrica, realizando un análisis económico del sistema, esto con el fin de diseñar un sistema de generación de energía eléctrica que permita al auto sostenimiento eléctrico y pueda funcionar o servir como guía de implementación para otras granjas.

1. Contexto general

1.1 Descripción del Problema

Debido a la industrialización, deforestación y agricultura a gran escala, las cantidades de GEI en la atmósfera se han incrementado en niveles nunca antes vistos en tres millones de años, lo que causa serios problemas que desencadenan el cambio climático. Existen pruebas alarmantes e indicios que aseguran que se han sobrepasado los puntos de inflexión que originan y originarán cambios irreversibles en los ecosistemas; el 23% de las emisiones globales de GEI son provenientes de actividades agrícolas. Por este motivo es necesario incursionar en sistemas que hagan los procesos agrícolas más amigables con el medio ambiente, teniendo en cuenta que una de las principales fuentes de GEI en nuestro país es la explotación de ganado (EFE, 2019).

Mediante los residuos orgánicos producidos por la explotación de ganado, después de ser sometidos a un sistema de digestión anaeróbico se puede obtener una fuente de energía renovable no convencional llamada biogás, el cual puede ser usado para la generación de energía eléctrica y térmica, haciendo así el proceso más sostenible (FAO et al., 2011). Teniendo como objeto de estudio una granja ubicada en el sector rural de Guadalajara de Buga, se ha planteado la posibilidad de generar un modelo de generación de energía, con los pasos para diseñar un sistema de producción de biogás que suplirá la demanda de energía eléctrica requerida por el proceso, con el fin de que el sistema sea energéticamente sustentable.

1.2 Justificación

Teniendo en cuenta lo expresado acerca de la riqueza natural y de la generación de GEI en Colombia, se hace necesario concientizar y desarrollar sistemas de generación eléctrica que no dependan de las fuentes hídricas, que sean amigables al medio ambiente y que produzcan menos GEI, que puedan ser utilizadas en todo el territorio colombiano, inclusive en las Zonas No Interconectadas (ZNI), lo que puede permitir un cubrimiento energético auto sostenible en las regiones que no poseen conexión eléctrica. En la actualidad en Colombia, alrededor de 1710 poblaciones se encuentran en las ZNI (Vivas, 2017). Se proyecta que la granja cuente con un sistema de generación de energía que supla en lo posible las necesidades energéticas requeridas en el proceso productivo de la granja. También, se podrá reducir el impacto ambiental producido por no tener un tratamiento adecuado de los desechos que producen los cerdos en la granja.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de generación de energía eléctrica para la granja El Recreo, productora de ganado porcino ubicada en el sector rural de Guadalajara de Buga.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar la cantidad de biogás que se puede generar a partir de los desechos de la granja y dimensionar el biodigestor y los elementos correspondientes para almacenar, transportar y purificar el biogás.

- Determinar el consumo de energía eléctrica de la granja y la potencia requerida del elemento motor.
- Seleccionar el elemento motor y el generador necesario.
- Diseñar el sistema eléctrico para el uso de la electricidad generada con base en las necesidades de la granja y elaborar los planos correspondientes.
- Realizar un análisis económico del sistema.

2. Marco teórico

El correcto manejo de los residuos orgánicos producidos en la explotación agrícola se obtiene a través de distintos tipos de tratamientos que implican un reciclaje de estas materias orgánicas obteniendo productos con valor agregado para el sistema. Un tipo de tratamiento es la biodigestión, que consiste en la exposición de la materia orgánica a una población microbiana que tienen un rango de respuesta frente a las moléculas de oxígeno, esto permite crear bioprocesos en funciones de la presencia y ausencia de oxígeno, o también llamados procesos de digestión anaeróbica y digestión aeróbica (FAO et al., 2011).

2.1 Caracterización de la granja

La caracterización de espacio de la granja es un aspecto relevante a la hora de dimensionar el sistema de generación de potencia a partir de biogás, pues de la ubicación geográfica dependen factores, como la temperatura promedio que es determinante a la hora de calcular la capacidad volumétrica del biodigestor, como lo veremos más adelante. Además, factores como el número de animales y su etapa productiva, tienen influencia directa sobre la tasa de producción de biomasa.

2.1.1 Ubicación geográfica

Por lo general, las granjas porcinas deben estar a una distancia relativamente corta de alguna cabecera municipal que sirva como potencial plaza de comercialización de los productos derivados. Se considera que un trayecto de transporte de más de 6 horas, puede afectar considerablemente la rentabilidad de la granja. Asimismo, el terreno debe ser de fácil acceso para los proveedores de materia prima y alimentos. Por otro lado, las granjas deben estar a una distancia mayor a 5km de zonas de alta población.

Es conveniente que la granja se ubique en un terreno con pendientes para poder manejar drenajes por gravedad, reduciendo la inversión en sistemas de bombeo. Los suelos preferiblemente deben tener una buena permeabilidad por cuestiones de bioseguridad y la vivienda principal debe ubicarse de tal forma que permita la vigilancia constante en la entrada de la granja (Ministerio de producción: Gobierno de la Pampa, 2001).

2.1.2 Clima

Clima, es el nombre que reciben el conjunto de condiciones atmosféricas que determinan los estados del tiempo en una zona geográfica dada. El estudio del clima suele dividirse en variables como la humedad, la radiación solar, la presión, la precipitación, la temperatura y otros (Escardó, 2001).

La temperatura, junto con otros factores como el nivel de pH y el contenido de nutrientes en el biodigestor, son las variables locales del biodigestor responsables de la efectividad de la producción del biogás (FAO et al., 2011).

2.1.3 Tipos de cerdos en granja

La tasa de estiércol diaria producida por los porcinos, depende directamente de su etapa productiva. Por esta razón, se suelen clasificar la población animal de la granja bajo las siguientes categorías (SERRATO & LESMES, 2016):

- Precebo: es una etapa comprendida entre los 21 y los 70 días de vida del lechón, en la cual, éste debe alcanzar los 32 kg de peso.

- Levante: es la etapa comprendida entre los 70 y los 112 días de vida. Al finalizar esta etapa el cerdo debe pesar alrededor de 75 kg.
- Reproductor: son los cerdos machos que ya pueden cumplir funciones reproductoras. Este periodo se comprende entre los 6 meses y los 3 años de edad.
- Hembra lactante: son los cerdos hembra que se encuentran en un periodo de celo, en el cual producen la leche para alimentar los lechones. Estas hembras deben tener un cuidado especial para mantener su estado corporal y garantizar una alta producción de leche.
- Hembra gestante: son las hembras usadas para la actividad reproductiva. Este periodo puede durar 113 días, en los cuales se les debe garantizar alimentación con alto contenido nutricional.

La tasa de producción de estiércol anual en función de la etapa productiva de los porcinos se resume en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Tasa de producción de estiércol.

Etapa productiva	Tasa de producción de estiércol (kg/año)
Precebo	459.9
Levante	1036.6
Reproductor	1744.7
Hembra lactante	5631.9
Hembra gestante	2226.5

Fuente: (SEMARNAT, 2010).

2.1.4 Potencial energético de la granja

La estimación teórica del poder energético que se puede extraer de cierta cantidad de materia orgánica, depende de modelos matemáticos aproximados. Las variables están en función del residuo o materia orgánica en estudio y la precisión del modelo depende del uso de factores realistas (Ministerio de Minas Y Energía, 1972). A continuación se presenta un modelo matemático simple, empleado para la estimación de la producción de biogás a partir de excreta porcina y su potencial energético (Asociación porkcolombia, 2015).

2.1.5 Capacidad de generación de biogás

A partir de la tasa anual de producción de estiércol por etapa (*TPE*), se puede estimar la cantidad de porcina (estiércol porcino) generada en la granja en un año (*E*). Para esto se usa emplea la ecuación 2.1.

$$E = \sum N_i * TPE \quad (2.1)$$

Donde (N_i) es la cantidad de animales por etapa productiva

Posteriormente, se procede a determinar la cantidad de sólidos volátiles (*SV*) contenidos en la porcina, que corresponden a un 80% de la masa total. Para este paso se utiliza la ecuación 2.2.

$$SV = \%SV * \%MS * E \quad (2.2)$$

Donde *MS*, es la materia seca contenida en la porcina, la cual corresponde a un 6% de la masa total.

Luego, mediante la ecuación 2.3 se puede calcular el volumen de biogás generado, al considerar que por cada kilogramo de sólidos volátiles se pueden extraer 400 litros de biogás.

$$B = SV * 400l/kg_{sv} \quad (2.3)$$

Por último, basta conocer qué porcentaje de este gas generado corresponde a metano (CH_4), que es en últimas el gas empleado para la combustión. Para porcinaza, se acepta que el 60% del biogás generado sea metano.

$$CH_4 = B * 0.6 \quad (2.4)$$

2.1.6 Poder calorífico

Es la variable principal al momento de determinar cuánta energía se puede extraer de cierta cantidad de combustible o biocombustible. El poder calorífico del biogás, según la literatura es de 5500 kcal/m^3 (23012 kJ/ m^3). Esto, considerando que el 60% del biogás es metano y el 40% restante es dióxido de carbono CO_2 y trazas de otros gases. De esta forma, mediante procesos de filtrado y purificación se puede obtener metano puro, que cuenta con un poder calorífico de 9300 kcal/m^3 (38911 kJ/ m^3) (Gon, 2008).

2.2 Biodigestión

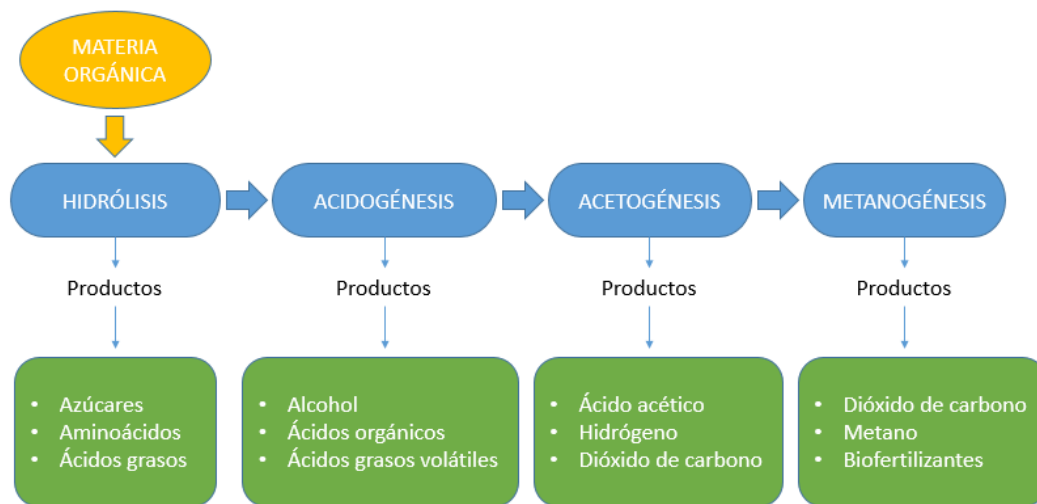
La biodigestión es un proceso bioquímico de alta complejidad que se presenta de forma natural en el tracto intestinal de animales, en pozos negros y canales de aguas residuales. Este se lleva a cabo por la interacción de microorganismos en presencia o ausencia de oxígeno, que dan cabida a la digestión aeróbica o anaeróbica, respectivamente (Gon, 2008). Para los procesos de generación de biogás, se suele utilizar la digestión anaeróbica por encima de la aeróbica, porque esta última, implica grandes costos operacionales y carece de parámetros y criterios para el desarrollo de sistemas óptimos (FAO et al., 2011).

2.2.1 Digestión anaeróbica

Es un proceso de biodegradación de materia orgánica en ausencia de oxígeno, llevado a cabo por algunos microorganismos. Este proceso es ampliamente usado para el tratamiento de aguas residuales y residuos agrícolas, y es considerado como vital para la producción de biogás rico en metano, el cual es una alternativa al uso de combustibles fósiles (Curry & Pillay, 2012). Otros subproductos de los procesos de biodigestión son los biofertilizantes y bioabono ricos en nutrientes.

La digestión anaeróbica es efectuada en cuatro etapas. Estas son la hidrólisis, la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019). En la figura 2-1, se resume la secuencia de procesos que conforman la digestión anaeróbica y sus subproductos.

Figura 2-1. Etapas de la digestión anaeróbica



Fuente: Elaboración propia

2.3 Factores determinantes en la generación de biogás

Los microorganismos encargados de la degradación del material orgánico son altamente sensibles a los factores físico-químicos que afectan la metanogénesis (Rivas Solano et al., 2010). Los factores más relevantes se muestran a continuación.

2.3.1 Composición de la materia orgánica

La presencia de elementos como carbono, azufre y nitrógeno en la biomasa, es un parámetro deseable, pues estos elementos son nutrientes que permiten el desarrollo de las poblaciones microbianas que degradan la materia. Asimismo, la ausencia de contaminantes y patógenos se considera un punto a favor. Por tales razones, los residuos agrícolas y urbanos con alto contenido de humedad, así como las excretas humanas y animales, se consideran sustratos ideales para la digestión anaeróbica. Algunos de estos residuos pueden ser estiércol, orina, guano, sangre, rastrojo, forraje, malezas, semillas, hojas, ramas, cortezas, algas marinas, etc. (Rivas Solano et al., 2010).

2.3.2 Temperatura

Al igual que en la mayoría de los procesos biológicos, la digestión anaeróbica presenta una dependencia directa con la temperatura. Esto pues, la tasa de crecimiento poblacional bacteriano aumenta con el incremento de la temperatura, siendo este un factor fuertemente relacionado con la capacidad de producción de biogás de un sistema. En sistemas de alta eficiencia, es indispensable contar con equipo de agitación continua y un controlador de temperatura, pues los cambios bruscos de este parámetro pueden descompensar severamente el proceso. Como se muestra más adelante, la temperatura determina el tipo de bacteria que se desarrollará en el biodigestor (Tabla 2-2), y por consiguiente, el tiempo de retención del material orgánico en su interior (FAO et al., 2011).

Tabla 2-2. Grupos bacterianos en función de la temperatura

Grupo bacteriano	T. mínima (°C)	T. óptima (°C)	T. máxima (°C)
Psicrofílico	4-10	15-18	20-25
Mesofílico	15-20	25-35	35-45
Termofílico	25-45	50-60	75-80

Fuente: (FAO et al., 2011)

2.3.3 Tiempo de retención hidráulica (THR)

Es el tiempo que la materia orgánica o sustrato requiere estar en el biodigestor para completar el proceso de generación de biogás, aprovechando al máximo dicho sustrato. Las bacterias que operan a mayores rangos de temperatura tienen mayor capacidad de degradación del sustrato por unidad de tiempo. Esto implica que, a mayor temperatura, menor será el TRH. Otra implicación importante es que a menor TRH, menor debe ser la capacidad volumétrica del biodigestor (Asociación porkcolombia, 2015). En la Tabla 2-3, se presentan los TRH en función de la temperatura.

Tabla 2-3. Tiempo de retención hidráulico

Temperatura (°C)	TRH (días)
35	25-30
30	30-40
25	35-50
20	50-65
15	65-90
10	90-125

Fuente: (Asociación porkcolombia, 2015).

2.3.4 Contenido de agua

El contenido de agua de la mezcla excreta-agua tiene una proporción óptima para la generación de biogás. Cuando el contenido de agua es bajo, el potencial de generación de biogás se ve reducido. Por otro lado, si la mezcla está excesivamente diluida, la materia orgánica en el digester se verá reducida y asimismo, el biogás generado. Por consiguiente, se establece que para excreta animal la proporción en peso debe mínimo de 1:1 (Olaya, 2009).

2.3.5 Nivel de pH

El pH es el grado de acidez o alcalinidad que presenta una sustancia o ambiente. Los cambios de pH en sistemas de biodigestión pueden afectar la actividad biológica microbiana. Así pues, es aceptado un pH levemente por debajo de 7 como el valor óptimo. Cuando el pH se sale de su rango normal, se pueden llevar a cabo diferentes acciones para tratar de controlarlo. Estas son adicionar cal, adicionar ácidos orgánicos o inorgánicos, adicionar agua o reducir la carga orgánica del biodigestor, dependiendo si el pH está por encima o por debajo del valor óptimo (Acosta, 2005) .

2.4 Selección de biodigestor

Los biodigestores son tanques o recintos construidos de diferentes tipos de material, que se utilizan para la generación de biogás a partir de materia orgánica. Su función es almacenar herméticamente dicha materia por un periodo de tiempo especificado, hasta completar el proceso de metano génesis (Acosta, 2005).

2.4.1 Tipos de biodigestores

Existen diversos tipos de biodigestores que se pueden diferenciar de muchas formas. Los parámetros más destacados son su nivel tecnológico, tamaño y tipo de sustrato a utilizar. Su selección depende básicamente de los recursos económicos disponibles y del sustrato

de alimentación (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019). Los biodigestores más simples son los tipo batch (Figura 2-2), que se usan a escalas pequeñas o condiciones de laboratorio. Estos se usan para investigar el potencial de generación de biogás de sustancias orgánicas, y son de fácil construcción y manipulación.

Figura 2-2. Biodigestor tipo batch



Fuente: (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019).

Los biodigestores tubulares o taiwaneses (Figura 2-3) son fabricados con materiales poliméricos como el policloruro de vinilo PVC, el etileno propileno EPD y el polietileno de alta densidad PDA. Son versátiles tanto en instalación como en operación, ya que pueden enterrarse o apoyarse simplemente sobre el suelo. El espesor de su membrana no debe ser inferior a 0,8 mm y los suplementos usados para su montaje deben tener alta resistencia a la radiación solar y a los agentes químicos. Sus ventajas son de bajo costo de construcción y operación, y que su instalación puede ser realizada por personal con escasos conocimientos sobre construcción. Sus desventajas son la baja presión del gas y su corta vida útil de máximo 8 años (Olaya, 2009).

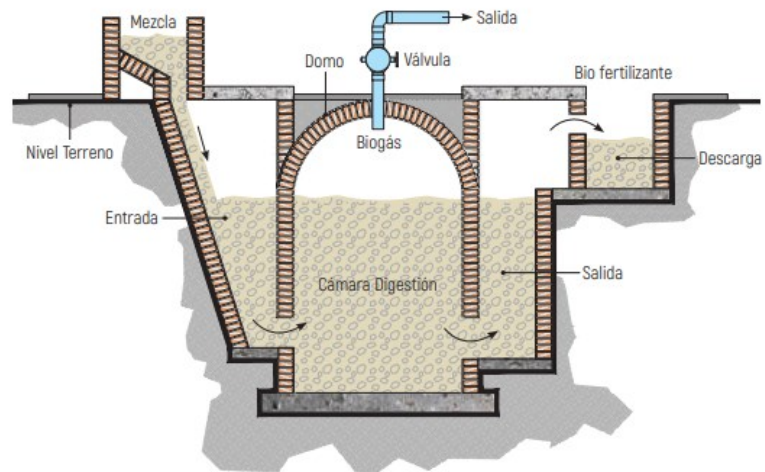
Figura 2-3. Biodigestor tubular



Fuente : (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019).

Los digestores chinos o de cúpula (Figura 2-4), se construyen a partir de materiales rígidos como ladrillo, hormigón y otros. Son de estructura fija y son considerablemente más duraderos que otros. Deben ser fabricados en sitio, lo que aumenta el costo de montaje. Se prestan para el montaje de cúpulas móviles, sistemas de agitación y muchas otras variaciones. Sus ventajas son su extensa vida útil (alrededor de 20 años), las pocas partes de desgaste y su presión constante para digestores de cúpula móvil (Olaya, 2009).

Figura 2-4. Biodigestor chino



Fuente: (Almanza, 2011)

2.5 Dimensionamiento del digestor

Después de seleccionar el tipo de biodigestor a utilizar, se procede con su dimensionamiento. Este procedimiento se muestra a continuación.

2.5.1 Calculo del volumen de la mezcla agua- estiércol

El volumen de la mezcla agua-estiércol (V_m) viene dada por la ecuación 2.5.

$$V_m = \frac{M_e + M_a}{D_m} \quad (2.5)$$

Donde, M_e es la masa de estiércol producida por día, M_a es la masa del agua que funge como solvente y D_m es la densidad de la mezcla, la cual se puede asumir como la densidad del agua (1000 kg/m^3) (Marszałek et al., 2014).

2.5.2 Dimensionamiento del digestor

El volumen mínimo del biodigestor (V_B) puede calcularse mediante la ecuación 2.6.

$$V_B = V_m * TRH \quad (2.6)$$

Luego, debe considerarse por lo menos un 1/3 más del volumen calculado para proporcionar espacio para el almacenamiento del biogás (Marcelo et al., 2017). Así, el volumen real del biodigestor (V_{BR}) viene dado por la ecuación 7.

$$V_{BR} = V_B * 1.33 \quad (2.7)$$

Considerando un biodigestor tubular, se puede determinar una combinación de diámetro (D) y longitud (L) aceptables para el diseño, las cuales dependen del espacio disponible en la granja. Estas dimensiones se relacionan con el volumen real de biodigestor mediante la ecuación 2.8.

$$V_{BR} = \frac{\pi D^2}{4} * L \quad (2.8)$$

2.6 Tuberías y accesorios

2.6.1 Dimensionamiento de tuberías y accesorios

Para determinar los diámetros de las tuberías a utilizar, se debe trazar su recorrido especificando longitudes y accesorios en cada tramo. Luego, las pérdidas de presión en milibares (Δp) se pueden determinar mediante la ecuación 2.9 (Marcelo et al., 2017).

$$\Delta p = 23200\rho_r L_{eq} Q^{1.82} D^{-4.82} \quad (2.9)$$

Donde D es el diámetro interior de la tubería en mm, Q es el caudal del fluido en m^3/h , L_{eq} es la longitud equivalente en m y ρ_r es la densidad relativa, que para biogás corresponde a $\rho_r = 0.83$.

La longitud equivalente en cada tramo se puede determinar con la expresión 2.10.

$$L_{eq} = L_r + L_a \quad (2.10)$$

Donde L_r es la longitud de la tubería sin accesorios y L_a es la longitud equivalente correspondiente a accesorios. Esta última se puede encontrar en la literatura para diferentes tipos de accesorio en función de su diámetro interno.

2.6.2 Materiales para tuberías y accesorios

El PVC, el acero galvanizado y el PET, son materiales ampliamente usados en instalaciones de distribución de gas orgánico. Al seleccionar el material para un sistema de generación de biogás, se debe tener en cuenta que esta sustancia posee vapor de agua y sulfuros que son altamente corrosivos, y que pueden degradar rápidamente los componentes del sistema (Marcelo et al., 2017).

2.7 Acondicionamiento del biogás

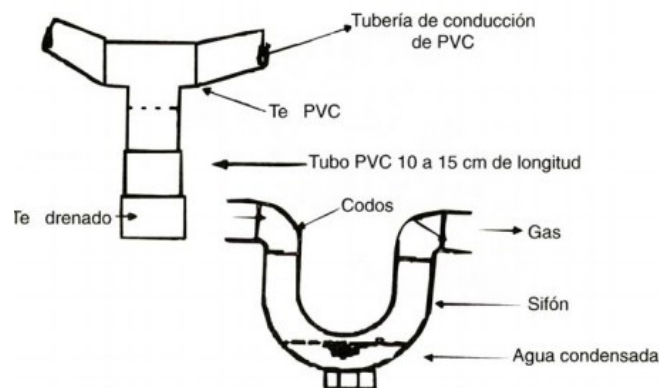
El biogás generado en biodigestores de materia orgánica, contiene algunos agentes nocivos para los sistemas de transformación y aprovechamiento de la energía. Estos

agentes son vapor de agua y CO_2 , que disminuyen el poder calorífico, y H_2S , que tiene el potencial de transformarse en ácido sulfúrico, el cual es altamente corrosivo y puede afectar los sistemas de combustión (Minenergía, 2012). Por lo anterior, para el aprovechamiento del biogás se requieren tres etapas básicas de refinamiento o purificación. Estos son: secado, desulfuración y absorción de CO_2 .

2.7.1 Secado del biogás

El biogás proveniente de un biodigestor contiene vapor saturado, que debido a los descensos de temperatura en las tuberías puede condensarse y obstruir los conductos. Para este fin, suelen emplearse trampas de agua, como las de tipo cerrada y abierta con válvula de bola para evacuación de condensados. Estas deben ser revisadas de forma periódica durante su operación (Guardado, 2007). Sin embargo, existen métodos más sencillos de solucionar este problema. Cuando la tubería de conducción es de gran longitud, ésta se puede instalar con una cierta inclinación hacia el biodigestor para que los condensados se devuelvan hacia este. La otra forma es instalar un recipiente, Te de drenaje o sifón (Figura 2-5), que permitan la fácil extracción del agua (SENA, 2008).

Figura 2-5. Trampas de agua sencillas



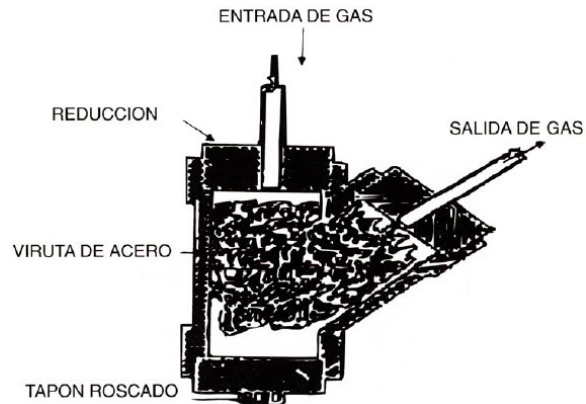
Fuente: (SENA, 2008)

2.7.2 Desulfuración

Como ya se mencionó, la potencial formación de ácido sulfúrico en el sistema de generación de potencia, puede llevar al desgaste acelerado de sus componentes, además de los riesgos de envenenamiento para las personas expuestas. Por estos motivos, es indispensable contar con un equipo que permita eliminar la mayor parte de esta sustancia. Existen diversos métodos por los cuales se puede llevar a cabo este proceso. Por ejemplo, el método de oxidación biológica, en el cual se inyecta aire al biodigestor, donde los microorganismos consumen el oxígeno del aire y el H_2S , produciendo azufre y agua. Este método es eficiente, simple y de bajo costo. También existe la opción de administrar cloruros, fosfatos u óxidos de hierro durante la biodigestión. Estos compuestos reaccionan con el H_2S formando sulfuros de hierro. Este método se usa cuando las concentraciones de H_2S son elevadas (Asociación porkcolombia, 2015).

Por su parte, la oxidación biológica en filtro húmedo, consiste en añadir O_2 en la corriente de biogás y posteriormente pasar la mezcla por una torre o filtro humectado, en el cual hay microorganismos que transforman los reactivos en azufre puro. El método de Scrubbing con agua, consisten en una torre de lavado donde se deja caer agua por gravedad y el biogás viaja en contracorriente, absorbiendo el H_2S por medios físicos. Este método permite remover H_2S y CO_2 del biogás (Asociación porkcolombia, 2015). Asimismo, en el método de absorción por carbón activado, se hace pasar el biogás por un filtro de carbón activado impregnado de yoduro de potasio, que reacciona con el H_2S transformándolo en azufre elemental. Por otro lado, el método de absorción química con óxido de hierro, emplea un empaque o recipiente con óxido o hidróxido de hierro que, al entrar en reacción con el H_2S , generan productos sólidos de azufre. Este último método, por su simplicidad y bajo costo es el más usado en plantas de micro generación. Generalmente, se utiliza una “caja seca” con virutas de acero o hierro en su interior (Figura 2-6). Otro beneficio importante de esta técnica, es que las virutas fungen como trampa de llamas, evitando su propagación hacia el biodigestor (SENA, 2008).

Figura 2-6. Caja seca con viruta de hierro para desulfuración



Fuente: (SENA, 2008)

2.7.3 Absorción de CO₂

La finalidad de remover el CO₂ del biogás es aumentar la concentración de metano CH₄, aumentando el poder calorífico. En esencia, existen 4 métodos para remover CO₂.

El método de torre de lavado o Scrubbing, que ya se mencionó anteriormente, consiste en la alimentación del biogás comprimido desde la parte baja de una columna y agua en forma de rocío desde la parte superior. Así, en un proceso de contraflujo el CO₂ es removido. Este método es de bajo costo y se suele usar para bajos caudales de biogás. Por su parte, el método de absorción química emplea soluciones acuosas de aminas y sales alcalinas, que rompen los enlaces del CO₂ en una reacción exotérmica. Para este proceso se emplea una columna de absorción a contraflujo (Cusi, 2018).

El método de separación por membrana, consiste en la retención del CO₂ mediante una membrana fina, que por efecto de la presión parcial de los gases y la permeabilidad del CO₂ en el material de la membrana, puede purificar el metano en un 88% en una sola etapa. Para múltiples etapas la pureza puede alcanzar hasta el 98%. Por otro lado, el método de conversión química, que se emplea para niveles altos de purificación, tiene un costo considerablemente elevado y se usa como método complementario a procesos previos de

purificación. La forma de conversión química más empleada es la metanización, a partir de la cual el CO_2 y el H_2 se transforman en metano y agua (Cusi, 2018).

Para instalaciones de producción de biogás a escala pequeña, es conveniente emplear sistemas de absorción de CO_2 de baja tecnología, pues de esta forma no se afecta de manera considerable la rentabilidad de la operación. Existe un método que no implica instalaciones complejas, ni sistemas externos complementarios. Este método, conocido como secuestro mineral de CO_2 o carbonatación, consiste en la formación de carbonatos sólidos productos de la reacción entre el dióxido de carbono y óxidos alcalinos, usualmente encontrados en rocas naturales y residuos metalúrgicos como la escoria. A continuación se listan algunos minerales usados para esta aplicación (Rodríguez & Violeta, 2018).

- Carbonato de calcio (CaCO_3)
- Carbonato de Magnesio (MgCO_3)
- Carbonato de Hierro (FeCO_3)
- Carbonato de Manganeso (MnCO_3)
- Carbonato de Zinc (ZnCO_3)

2.8 Generación de potencia

Para proceder con la generación de potencia, en este proyecto se usará un sistema de generación que será alimentado con el biogás producido y acondicionado por los diferentes procesos de la planta.

El tamaño del equipo de generación depende de la potencia diaria disponible en el biogás producido. Para determinar esta potencia se emplea la ecuación 2.11 (Minenergía, 2012).

$$P_{nom} = E_{día}/24 \quad (2.11)$$

Donde, P_{nom} es la potencia nominal en kW y $E_{día}$ es la energía disponible por día en kWh.

Luego, para conocer la potencia eléctrica (P_e) que se puede extraer del biogás, se utiliza la ecuación 2.12.

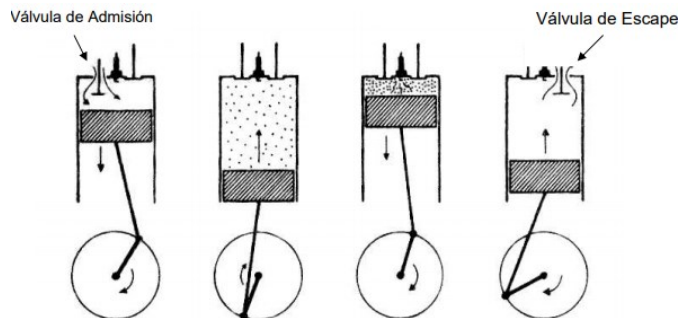
$$P_e = P_{nom} * \eta \quad (2.12)$$

Donde η , es el producto de las eficiencias del motor de biogás y del generador eléctrico. La generación de potencia eléctrica a partir de biogás, en esencia se puede llevar a cabo a partir de tres diferentes sistemas. A continuación, se muestran sus fundamentos.

2.8.1 Motor de combustión interna

Un motor de combustión interna es una máquina que transforma energía térmica en mecánica mediante un proceso de combustión que tiene lugar en el interior del cilindro de trabajo. Los gases de alta energía producto de la combustión, impactan sobre el émbolo y éste a su vez sobre la biela, generando un movimiento alternativo o recíproco (Giraldo & Trujillo, 1994), en la Figura 2-7 se ejemplifica el movimiento recíproco de estas máquinas

Figura 2-7. Movimiento recíproco en motor de combustión interna



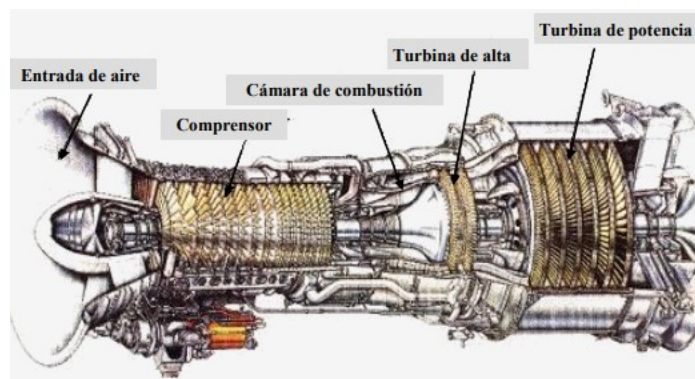
Fuente: (Mercedes et al., 2014).

Los motores de combustión interna son los sistemas más usados para aplicaciones de biogás, pues presentan una alta eficiencia (entre el 35 y 40%) y una baja relación costo/kW generado, en comparación con otros sistemas. Estos sistemas son flexibles, pues según los requerimientos energía y el biogás disponible pueden adicionar o quitar motores. Estos sistemas presentan potenciales de generación de hasta 3 MW (Blanco et al., 2017).

2.8.2 Turbina de gas

Una turbina de gas es un motor de reacción que aprovecha la cantidad de movimiento lineal de los gases de alta energía que pasan alrededor de los álabes, para generar movimiento rotacional en el eje de la turbina. Grosso modo, la pérdida de presión y temperatura de los gases de combustión al pasar por los álabes, es equivalente a la energía que la turbina entrega (Genzor, 2011), en la Figura 2-8 se muestran las principales partes de una turbina a gas.

Figura 2-8. Partes de una turbina de gas



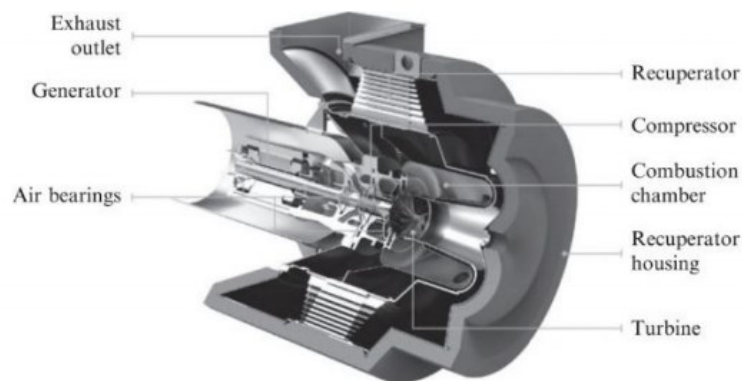
Fuente: (G. Garrido, 2011).

Las turbinas de gas se utilizan en proyectos de generación de entre 3 MW y 5 MW. A mayor tamaño de la turbina, mayor eficiencia y menor relación costo/MW. Sus valores típicos de eficiencia están entre 20 y 28%. Son más resistentes a la corrosión y al desgaste que los motores de combustión interna, lo que implica menores costos de mantenimiento y su emisión de gases contaminantes es menor (Blanco et al., 2017).

2.8.3 Micro turbina

Pertencen a una tecnología emergente que representa una solución alternativa para los proyectos de generación de potencia a pequeña escala. Actualmente su rango de generación se encuentra entre 28 kW y 200 kW. Las ventajas más relevantes de esta tecnología son sus bajos niveles de emisiones y ruido, y el reducido tamaño de la instalación. Por otra parte, poseen bajos costos de mantenimiento y su eficiencia, por lo general, no supera el 30% (Bruno et al., 2002), en la Figura 2-9 se muestran los principales componentes de una micro turbina

Figura 2-9. Micro turbina a gas



Fuente: (Figuerola, 2018).

2.9 Diseño de sistema eléctrico

2.9.1 Cálculo de caída de tensión de conductores

La caída de voltaje se puede determinar de acuerdo a la ley de Ohm con la ecuación 2.13 (Harper, E 2004).

$$V = RI \text{ (V)} \quad (2.13)$$

Donde, I es la corriente nominal del circuito y R la resistencia, que se puede expresar en términos de las características del conductor con la ecuación 2.14

$$R = \rho L/S \quad (2.14)$$

Dónde: $\rho = \frac{\text{Resistividad del conductor en ohm-mm}^2}{m}$, L longitud del conductor en metros y S la sección transversal del cable.

La caída de voltaje finalmente se puede expresar como

$$V = \frac{\rho LI}{S} \quad (2.15)$$

La resistividad de algunos materiales conductores se muestra en la Tabla 2-4 (Morales, 2011):

Tabla 2-4. Resistividad de materiales conductores

MATERIAL	RESISTIVIDAD Ohm mm ² /m
Aluminio	0,0283
Cobre	0,0175
Constatan	0,5

Fuente: (S'2- Vkw Nacional de Aprendizaje SENA Subdi, 1977)

En la Tabla 2-5 se especifican las equivalencias de los conductores en mm² (*Tabla-de-Equivalencias-AWG-a-MM2.Pdf*, n.d.)

Tabla 2-5. Equivalencia de conductores en mm²

Equivalencias de AWG a mm2

AWG	mm ²	AMPERAJE
10	6	15
12	4	9,5
14	2,5	6
18	1	2,5
19	0,75	2
21	0,5	1,2

Fuente: (Tabla-de-Equivalencias-AWG-a-MM2.Pdf, n.d.).

2.9.2 Calculo de interruptores de corriente

Para calcular la corriente nominal del circuito para la selección de los interruptores automáticos de corriente se emplea la ecuación 2.16, y se emplea un factor de sobredimensionamiento de 1.25 de protección (Ezquen Zamora, 2018).

$$I = \frac{P}{V * C} \quad (2.16)$$

Donde I es la corriente nominal, P la potencia instalada, V el voltaje nominal del sistema y C el factor de potencia.

2.10 Análisis económico

Uno de los principales problemas de la inversión de capital es saber determinar si las entradas de efectivo anticipadas de un proyecto propuesto son lo suficientemente atractivas como para invertir en él. Una de las mejores formas de saber si un proyecto de inversión es aceptable o no, es calculando el valor presente neto (VPN), el cual compara el valor presente de todas las entradas de efectivo asociadas al proyecto con el valor presente de todas las salidas de efectivo asociadas (Chan, P 2009).

2.10.1 Valor presente neto (VPN)

El procedimiento básico para aplicar el criterio de valor presente neto de un proyecto se realiza siguiendo los siguientes puntos: (Chan, P 2009):

- Determinar la tasa de interés que se desea ganar sobre la inversión.
- Calcular la vida de servicio del proyecto
- Calcular las entradas de efectivo para cada periodo durante la vida de servicio del proyecto
- Determinar el flujo de efectivo para cada proyecto, por la ecuación 2.17.

$$\text{Flujo de efectivo neto} = \text{Entrada de efectivo} - \text{Salida de efectivo} \quad (2.17)$$

- Determinar el valor presente de cada flujo de efectivo neto a la tasa de interés establecida para cada periodo, ecuación 2.18. La suma de las cifras del valor presente de cada periodo se define como el VPN.

$$VP(i) = \sum \frac{A_n}{(1+i)^n} \quad (2.18)$$

Donde $VP(i)$ es el VPN calculado en i , A_n el flujo de efectivo neto al final del periodo n , i tasa de interés y n vida de servicio del proyecto.

En contexto general un VPN positivo significa que el valor equivalente de las entradas es mayor que el valor equivalente de las salidas, por lo que el proyecto genera unas ganancias.

3. Caracterización de la granja

En esta sección se muestran los resultados del diseño de la planta de micro generación a partir de biogás. Primero, se muestran las características principales de la granja en cuestión, para definir la capacidad de producción de porcinaza. Luego, se desarrolla la metodología de diseño propuesta en el marco teórico hasta llegar al dimensionamiento del biodigestor, los filtros y la selección del motor generador.

3.1 Granja El Recreo

La granja El Recreo es una explotación porcícola ubicada en el sector rural de Guadalajara de Buga a unos 9 km del casco urbano. La granja cuenta con 13 cocheras con capacidad máxima 130 animales (Figura 3-1), y además, cuenta con una casa principal donde residen 3 personas. Guadalajara de Buga, es un municipio perteneciente al departamento del Valle del Cauca, ubicado $3^{\circ} 54' 07''$ de latitud norte y $76^{\circ} 18' 14''$ de longitud al oeste del meridiano de Greenwich, en el suroccidente colombiano (Rangel, 2018). Por lo general, a lo largo del año las temperaturas mínima y máxima en este municipio son de 19°C y 30°C , respectivamente (Weather Spark, 2020). Así, se puede asumir una temperatura promedio de 24.5°C .

Figura 3-1. Granja El Recreo



Fuente: Elaboración propia.

En la actualidad, la granja no cuenta con un manejo adecuado de los residuos orgánicos producto de la explotación agrícola. La porcina proveniente de las cocheras es dirigida hasta un tanque de almacenamiento. Este tanque tiene un volumen aproximado de 10 m³. Cuando éste alcanza su nivel máximo de llenado (Figuras 3-2, 3-3 y 3-4), se da apertura manual a la válvula de drenaje para que la porcina se desplace por gravedad hasta un potrero aledaño. El requerimiento principal de los administradores de lugar, es lograr un manejo eficaz de la porcina producida por sus animales, para lo cual se consideró la opción de instalar una planta de generación de potencia a partir de biogás, que puede brindar un valor agregado a la granja, reflejado en el uso más eficiente de la energía.

Figura 3-2. Tanque de almacenamiento de estiércol.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-3. Tanque de almacenamiento de estiércol.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-3. Salida de tanque de almacenamiento.



Fuente: Elaboración propia.

En la actualidad, la granja cuenta con una población de 103 animales. La categorización de estos animales por etapa productiva se visualiza en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Población animal por etapa productiva y peso promedio

Etapa productiva	Número de animales
Precebo	60
Levante	40
Reproductor	1
Hembra lactante	2

Fuente: Elaboración propia.

4 Desarrollo

4.1 Cálculo del potencial energético de la planta

Se procede con el cálculo de la tasa anual de porcínaza generada en la granja. Para esto se emplean los datos de las Tablas 2-1 y 3-1, y se relacionan mediante la ecuación 2-1. De esta forma, la tasa anual de producción de porcínaza en la granja es de 82066,5 kg/año. Considerando un porcentaje de sólidos volátiles del 80% y un porcentaje de materia seca del 6%, se calculó la cantidad de sólidos volátiles (SV) contenidos en la producción anual de porcínaza de la granja. Esto es $SV = 3939,2$ Kg/año.

De esta forma, empleando la ecuación 2-3, el potencial de generación de biogás es de $B = 1.575.676,8$ l . Lo que equivale a $1575,7$ m^3 . Según su poder calorífico, de esta cantidad de biogás en estado crudo, se podrían obtener 36,3 GJ de energía al año. Mientras que, si se refina el biogás mediante procesos de secado, filtración y purificación, se podrían obtener 61,3 GJ.

4.2 Calculo del biodigestor

Por espacio, facilidad de instalación y costos, en este proyecto se trabaja con un biodigestor tubular. Con esta información se procede a calcular el volumen de sustrato que va a ser utilizado para alimentar el biodigestor. Usando una relación estiércol-agua de 1:1 y

considerando que la cantidad de porcিনaza producida diariamente es de 224,84 kg, se tiene que la masa total de la mezcla es de 449,7 kg. Luego, considerando una densidad de mezcla de 1000 kg/m^3 , mediante la ecuación 2-5 se tiene que el volumen de la mezcla es $V_m = 0,44 \text{ m}^3$.

De la Tabla 2-3, en función de la temperatura se seleccionó un tiempo de retención hidráulica promedio de 43 días. Luego, según la ecuación 2-6, el volumen mínimo que debe tener el biodigestor será de $V_B = 19,34 \text{ m}^3$. Posteriormente, usando la ecuación 2-7, el volumen real del biodigestor será de $V_{BR} = 25,7 \text{ m}^3$.

4.3 Selección del material para el biodigestor

Las geo membranas de Polietileno y PVC son los materiales comúnmente usados para la construcción de biodigestores tubulares de bajo costo. En un estudio realizado en la vereda Bellavista, municipio de El Dovio, se evaluó la influencia de este par de materiales sobre la eficacia de la generación de biogás a partir de porcিনaza. En los resultados se observó que no hubo diferencias significativas entre un material y el otro para los factores analizados, a excepción del costo, pues la geo membrana de polietileno puede costar un tercio del precio de la de PVC (Pedraza et al., 2002). Por esta razón, se usará polietileno en este proyecto.

La geo membrana de polietileno es óptima para trabajo en ambientes externos. Se suele emplear para revestimiento de lixiviados, cubrimiento de estanques y reservorios, y contención de líquidos. Tienen una alta resistencia a sales, ácidos, alcoholes y a los rayos UV. Sus propiedades mecánicas son función de su espesor (Tabla 4-1). Comercialmente, el rollo de este material viene por anchos de 1 hasta 8 metros, y la longitud depende del requerimiento del diseñador (Durman, 2011)

Tabla 4-1. Propiedades físico-mecánicas de la geo membrana de polietileno.

Propiedades	Norma	Unidad	Valores específicos					
			0,5	0,75	1	1,5	2	2,5
Espesor nominal	ASTM D 5199	mm	0,5	0,75	1	1,5	2	2,5
Densidad	ASTM D 792	g/c ³	0,941	0,941	0,941	0,941	0,941	0,941
Resistencia a la rotura	ASTM D 6693	kN/m	17	19	27	40	53	67
Elongación a la rotura	ASTM D 6693	%	700	700	700	700	700	700
Resistencia al rasgado	ASTM D 1004	N	80	90	126	187	249	311
Resistencia al punzonamiento	ASTM D 4833	N	200	220	320	480	640	800

Fuente: (Durman, 2011).

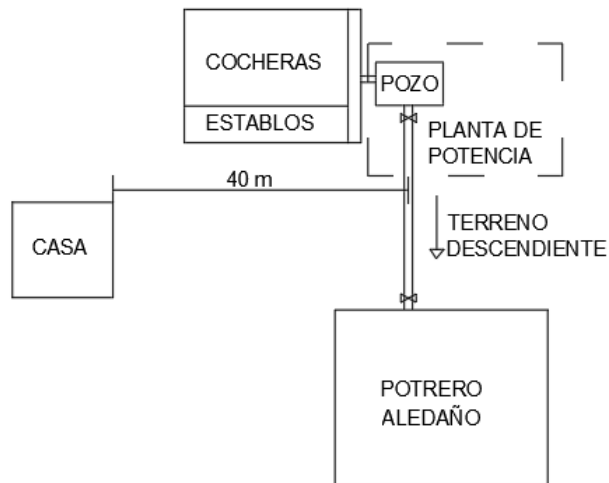
Según lo investigado en el marco teórico, el espesor del biodigestor no debe ser inferior a 0,8 mm. Luego, de la Tabla 4-1, se selecciona geo membrana de polietileno con el espesor inmediatamente superior, es decir, 1 mm. Por otra parte, para que el digestor sea fácilmente operable, conviene que su diámetro sea menor a 2m. Por tal razón, se seleccionó un ancho de la geo membrana de 3 m. Como inicialmente la membrana es plana, entonces el ancho es igual a media circunferencia.

Como el ancho de la geo membrana es igual media circunferencia, luego, esta circunferencia será de 6 m. Dividiendo esta circunferencia entre π , tenemos un diámetro de 1,9 m. Conocido el diámetro del biodigestor, despejando la ecuación 2-8 se calculó la su longitud, siendo esta de 9.06 m.

4.4 Cálculo de pérdidas en red de transporte de biogás

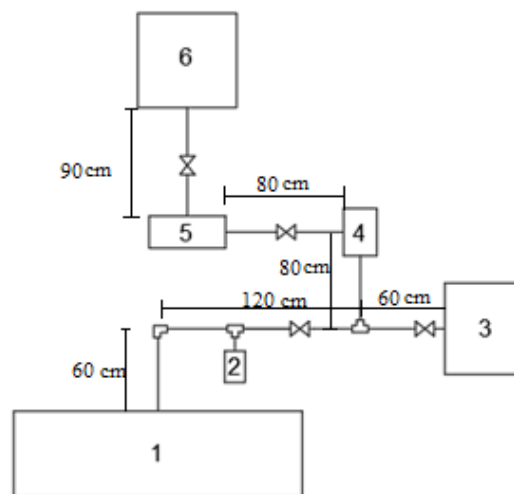
Para proceder con el cálculo de pérdidas, primero se plantea la ubicación de la planta de potencia respecto a las demás edificaciones de la granja (Figura 4-1), seguido de la configuración de sus diferentes componentes (Figura 4-2).

Figura 4-1. Ubicación de la planta de potencia.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-2. Distribución de planta de potencia.



Fuente: Elaboración propia.

La planta de potencia cuenta con 4 válvulas de cortina, un codo a 90° y 2 Tee. Por otra parte, sus componentes principales son:

1. Biodigestor.
2. Trampa de agua.
3. Tanque de almacenamiento de biogás.
4. Filtro de H₂S.
5. Eliminador de CO₂.
6. Motor generador.

En las Tablas 4-2, 4-3 y 4.4 se muestran iteraciones del cálculo de pérdida de presión en el sistema de tuberías, para 3 diferentes diámetros usualmente usados en estas aplicaciones, donde la longitud equivalente de los accesorios se tomó de la literatura (Gases del pacífico, 2014). Para calcular el caudal de circulación, se parte del volumen de biogás generado anualmente, el cual es un valor conocido (1575,7 m³). Este se divide entre el número de horas en el año (8760 h), obteniendo un caudal de $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-2. Pérdida de presión del sistema con tubería y accesorios de 3/8”.

Accesorio	Cantidad	ρ_r	Q (m ³ /h)	Dn (pg)	D (mm)	Leq (m)	Leq total (m)	Δp (mbar)
Codo 90°	1	0,83	0,18	3/8	12,54	0,37	0,37	0,0016
Tee	2	0,83	0,18	3/8	12,54	0,75	1,5	0,0064
Tubería	-	0,83	0,18	3/8	12,54	4,9	4,9	0,0211
Válvula de cortina	4	0,83	0,18	3/8	12,54	2,09	8,36	0,0361
Δp total (mbar)								0,0653

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-3. Pérdida de presión del sistema con tubería y accesorios de 1/2".

Accesorio	Cantidad	pr	Q (m ³ /h)	Dn (pg)	D (mm)	Leq (m)	Leq total (m)	Δp (mbar)
Codo 90°	1	0,83	0,18	1/2	15,8	0,37	0,37	0,00052
Tee	2	0,83	0,18	1/2	15,8	0,75	1,5	0,00212
Tubería	-	0,83	0,18	1/2	15,8	4,9	4,9	0,00694
Válvula de cortina	4	0,83	0,18	1/2	15,8	2,09	8,36	0,01185
Δp total (mbar)								0,02145

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-4. Pérdida de presión del sistema con tubería y accesorios de 3/4".

Accesorio	Cantidad	pr	Q (m ³ /h)	Dn (pg)	D (mm)	Leq (m)	Leq total (m)	Δp (mbar)
Codo 90°	1	0,83	0,18	3/4	20,93	0,37	0,37	0,00013
Tee	2	0,83	0,18	3/4	20,93	0,75	1,5	0,00055
Tubería	-	0,83	0,18	3/4	20,93	4,9	4,9	0,00179
Válvula de cortina	4	0,83	0,18	3/4	20,93	2,09	8,36	0,00306
Δp total (mbar)								0,00553

Fuente: Elaboración propia.

Del análisis anterior, se evidencia que la pérdida de presión es significativamente pequeña. Esto se debe principalmente al bajo nivel de caudal de biogás que pasa por el sistema de tuberías. Por costo, se seleccionan tuberías y accesorios de diámetro nominal de 3/8". Por otra parte, debido a su gran resistencia contra la corrosión y su bajo costo respecto a otros materiales (Bacon, 2018), se selecciona PVC como material para las tuberías y accesorios.

4.5 Selección componentes de purificación del biogás.

La selección de los equipos complementarios de purificación del biogás, fueron seleccionados en función del caso puntual que se presenta en este proyecto. Esto es, bajo caudal de biogás y micro generación de potencia. Por esto, fue deseable mantener reducidos al máximo los costos de instalación.

4.5.1 Trampa de agua

La trampa de condensado, como se mostró en el marco teórico (sección 2.7.1) se puede construir a partir de un recipiente conectado a la tubería de biogás mediante una Tee. Este recipiente debe contar con un tapón o válvula de drenaje. Un sistema similar se implementó en este proyecto (Figura 4-3), empleando un recipiente comercial de 2 litros, un tramo de tubería corto y una Tee de PVC.

Figura 4-3. Trampa de agua.



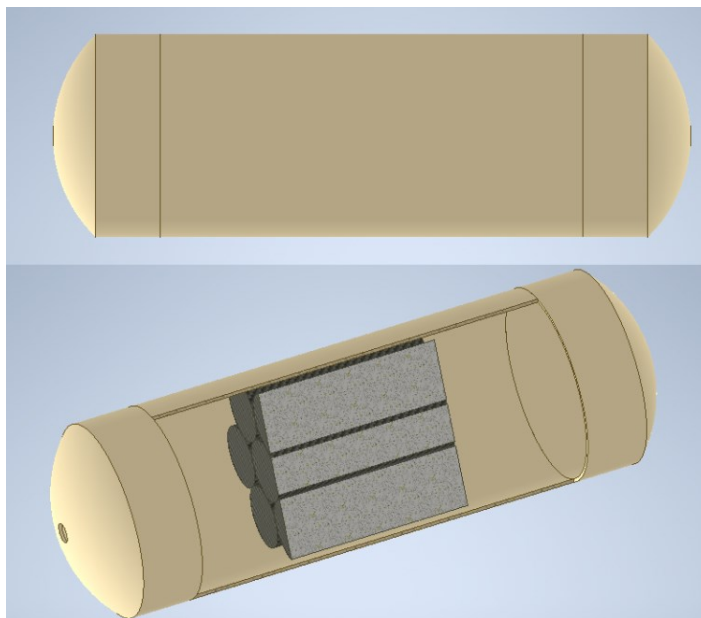
Fuente: Elaboración propia.

4.5.2 Filtro de H₂S

Así como para la selección de la trampa de agua, se seleccionó el sistema de remoción de sulfuro de hidrógeno más simple y económico. Este es el depósito seco con óxido de hierro. Para diseñar este sistema se usó un tramo de tubo de PVC de diámetro nominal 6", por una longitud de 350 mm.

Este cuenta con dos tapones en sus extremos que se conecta a la tubería de 3/8" por la que circula el biogás. Adicionalmente, en la parte interna cuenta con un entramado de esponjas metálicas de brillo, usadas normalmente para uso doméstico, que es un filtro comúnmente utilizado en estas granjas. En la figura 4-4 se muestra un esquema de este filtro.

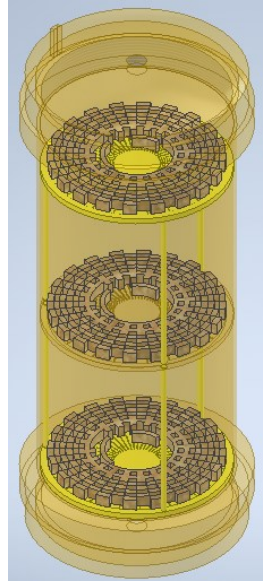
Figura 4-4. Filtro de H₂S



Fuente: Elaboración propia

4.5.3 Absorción de CO₂

Los minerales mencionados en la sección 2.7.3 generalmente son productos de la explotación minera, que se emplean en siderúrgicas para la extracción de hierro y posterior producción del acero, siendo el carbonato de calcio, el mineral más comercial y de fácil adquisición, pues el 50% de la composición de la piedra caliza corresponde a carbonato de calcio (CaCO₃) (Vaca et al., 2012). Por esta razón, se plantea un sistema de absorción de CO₂, que consiste en una columna fabricada a partir de un tramo de tubería de PVC de 6", con 3 rejillas a diferente nivel, que cuentan con piedra caliza trozada a tamaños de entre 2 y 6 mm, y tapas de PVC con perforaciones para la conexión con la tubería de 3/8" (Figura 4-5). El proceso de absorción del CO₂ se da mediante el contacto entre el biogás y el carbonato de calcio. La piedra caliza se debe cambiar regularmente para no perder la tasa de absorción de CO₂. Éste es un sistema exploratorio, pues en este proyecto no se evaluará la efectividad de absorción del CO₂. Sin embargo, se deja como punto de partida para su evaluación en próximos proyectos de investigación.

Figura 4-5. Sistema de absorción de CO₂.

Fuente: Elaboración propia.

4.6 Cálculo de generación de energía eléctrica

Al tratarse de una generación de potencia considerablemente baja y además, con biogás como combustible de alimentación, el mercado de equipos de generación eléctrica es limitado. En la Tabla 4-5, se listan algunos de los equipos consultados, de los cuales sólo hay un proveedor colombiano.

Tabla 4-5. Generadores eléctricos a gas cotizados.

Marca	Pulsar	PowerGen	Classic	puxin
Ubicación del proveedor	Chía, Colombia	Fujian, China	Zhejiang, China	China
Pico de potencia (W)	1200	1100	1000	1500
Potencia en operación (W)	900	1000	800	1200
Motor	2 tiempos	2 tiempos	-	4 tiempos
Combustible	Gas natural	Gas natural	Gas natural	Biogás
Tanque de combustible (L)	4,16	6	25	-

Voltaje de salida (V)	120	110 - 220	220	110 - 220
Costo (COP)	\$ 2.668.900	\$ 610.377	\$ 476.857	\$ 3.132.940
Costo de envío estimado (COP)	Gratis	\$ 915.566	\$ 715.286	\$ 830.230
Costo total (COP)	\$ 2.668.900	\$ 1.525.943	\$ 1.192.143	\$ 3.962.460
Garantía (años)	1	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 4-5, se puede observar que todos los equipos cotizados tienen potencia nominal por encima de la requerida. Sin embargo, esto puede ser beneficioso a mediano plazo, pues cuando la granja cumpla con el número límite de animales en sus instalaciones (130 porcinos), la capacidad de generación aumentará y será necesaria una planta más grande. Pasando a la selección del equipo, se descarta el generador "Classic", pues su salida mínima de voltaje es 220 V, lo que implicaría la instalación adicional de un transformador que baje la tensión a 110/120 V. Por su parte, los equipos "Pulsar" y "PowerGen" se descartan de igual manera ya que su combustible de operación es el gas natural, lo que daría lugar a una baja en el rendimiento del equipo. Como el combustible de este estudio es biogás, tiene menor poder calorífico. Por lo tanto, se seleccionó el generador Puxin (Figura 4-6) el cual tiene una salida de 110/120 V, un motor 4 tiempos y su combustible de operación es el biogás, por ende, cumple con todos los requerimientos del sistema

Figura 4-6. Generador eléctrico Puxin.



Fuente: (Alibaba 2020).

Según la ficha técnica del generador seleccionado este tiene un consumo de 0,9 m³/h, teniendo en cuenta que se tiene una potencia de generación de biogás de 4,3 m³/día el generador solo puede estar encendido durante 4 horas diarias, asumiendo que la potencia generada es constante a lo largo del mes, se puede estimar el ahorro económico mensual que presenta la granja. Para esto, se debe multiplicar la energía generada (1,2 kW), por el número de horas de trabajo al día (4 h), por los días del mes (30 días), dando como resultado 144 kWh/mes. Luego, considerando que para el año 2020 la tarifa de energía eléctrica es de \$535,38 pesos/kWh (Enel codensa, 2020), el potencial de ahorro mensual es de \$77.094 pesos.

Para evaluar el posible aprovechamiento de esta energía eléctrica, se caracterizó el consumo de energía en la granja a partir del número de electrodomésticos con los que cuenta la vivienda. Esto se puede visualizar en la Tabla 4-6. Como resultado, se establece que, con la potencia eléctrica real extraída del biogás producido en la granja, se podrían alimentar las luminarias exteriores e interiores de la cochera, la cerca eléctrica, las luminarias de la casa. Otra opción sería alimentar otra combinación de electrodomésticos con consumo inferior a 1200 W/h.

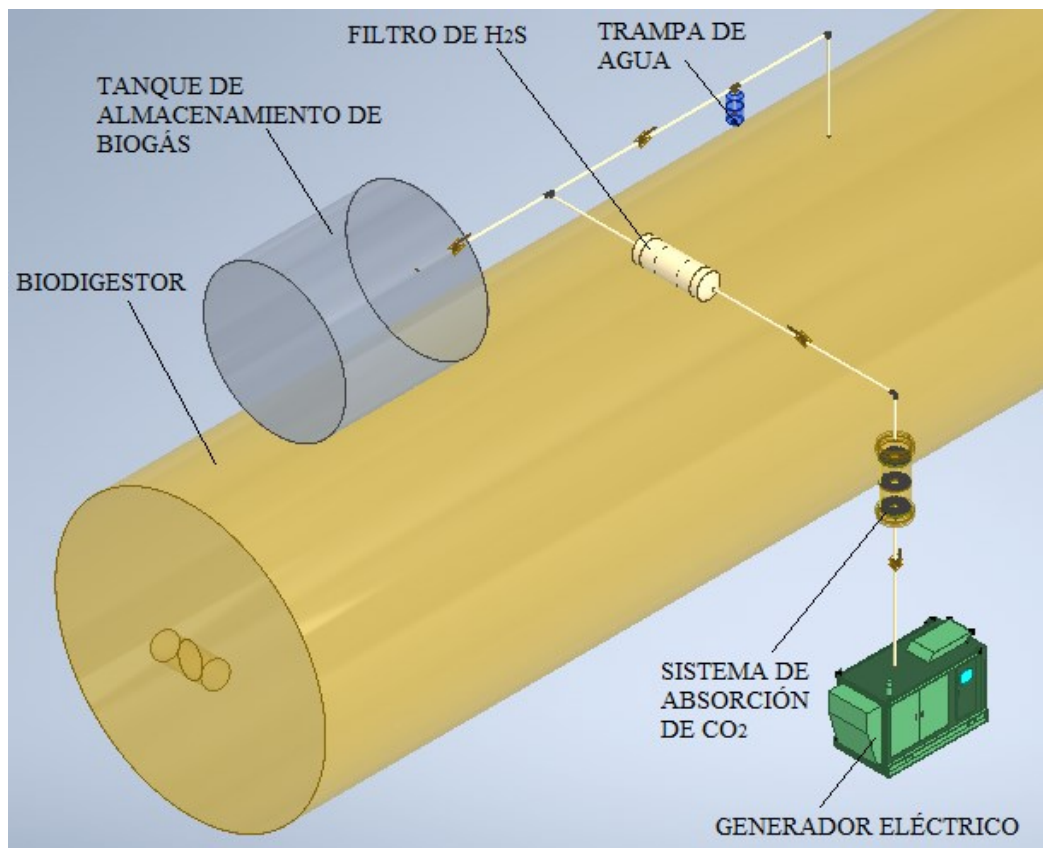
Tabla 4-6. Caracterización del consumo eléctrico en la granja El Recreo.

Ubicación	Equipo	Cantidad	Consumo (W)	Horas de funcionamiento por día	Consumo por día (W/h)
Cocheras	Luminarias interiores	6	8	4	192
	Luminarias exteriores	8	20	12	1920
	Cerca eléctrica	1	5	24	120
Casa familiar	Nevera	1	180	24	4320
	Televisor	1	70	4	280
	ventilador	1	60	4	240
	luminarias	5	8	4	160

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4-7 se presenta un CAD esquemático de la conexión y distribución de los componentes principales de la planta de biogás.

Figura 4-7. Distribución de planta de biogás.



Fuente: Elaboración propia.

4.7 Sistema eléctrico

Se procede a diseñar el sistema eléctrico del sistema, teniendo en cuenta el RETIE ya que este reglamenta todas las instalaciones eléctricas mayores a 25 V y con una frecuencia inferior a 1000 Hz, ya que en el sistema de generación de energía eléctrica solo se va alimentar el sistema de alumbrado y la cerca eléctrica, se especifican los siguientes puntos:

- Se utiliza la alimentación de energía eléctrica proveniente de la vivienda principal la cual tiene una tensión de 120 V bifásica, neutro y puesta a tierra.
- Distancias de seguridad prudentes entre la cerca eléctrica de la granja y la planta de potencia, ya que dentro de ella se encuentra el biogás generado y este es material combustible, descrito en la sección 2.8.2 del RETIE

- Código de colores para conductores estipulado en la sección 6.3 del RETIE.
- Se propone instalar nuevos portalámparas en las cocheras, ya que se encuentran en estado de deterioro, Se debe seleccionar portalámparas que estén certificados por el RETIE.
- Los elementos a seleccionar como: interruptores, interruptores automáticos, conductores, portalámparas, transferencia manual; deben tener certificado de conformidad de producto, conforme al RETIE.

4.7.1 Selección de ubicación de planta de potencia

Para la selección de la ubicación de la planta de potencia se tuvo en cuenta factores importantes a la hora de selección como son:

La cercanía del digestor con la tubería de salida de los desagües de las cocheras esto para facilitar la recolección de los desechos antes de ingresar al digestor y que se encontrará lo suficientemente alejada de la cerca de impulso eléctrico del potrero aledaño a las cocheras y a la ubicación de la planta de potencia ya antes caracterizada en la sección 3, como lo estipula el RETIE sección 20.8.

4.7.2 Interruptores de protección

Es importante mencionar que no se va a dimensionar ni seleccionar un interruptor de protección para el generador ya que este viene incorporado en el equipo.

Para realizar la selección de los interruptores es necesario conocer la corriente nominal del circuito, para esto se realiza la caracterización de la carga eléctrica del sistema de generación expresado en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7. Caracterización de potencias del sistema de generación

Cargas del sistema

Zona	Potencia W	Cantidad	Total W/h
Iluminación exterior	20	8	160
Iluminación de vivienda	8	5	40
Iluminación de cocheras	8	6	48
Planta de potencia	8	2	16
			264

Fuente: Elaboración propia.

Conociendo la potencia instalada del sistema especificada en la Tabla 4-7, se utiliza la ecuación 2-16 obteniendo que la corriente nominal del circuito es de 2,2 A. Utilizando el factor de sobreprotección de la sección 2.9.1, se determina que la corriente de protección es de 2,75 A, por lo cual se seleccionó un minibreaker de 3A para realizar la protección del circuito contra sobre corrientes.

4.7.3 Caracterización de conductores

Como ya se mencionó antes, se tendrá en cuenta el código de colores establecido en la sección 6.3 del RETIE, Se tendrán los siguientes colores que mostrados en la tabla 4-8:

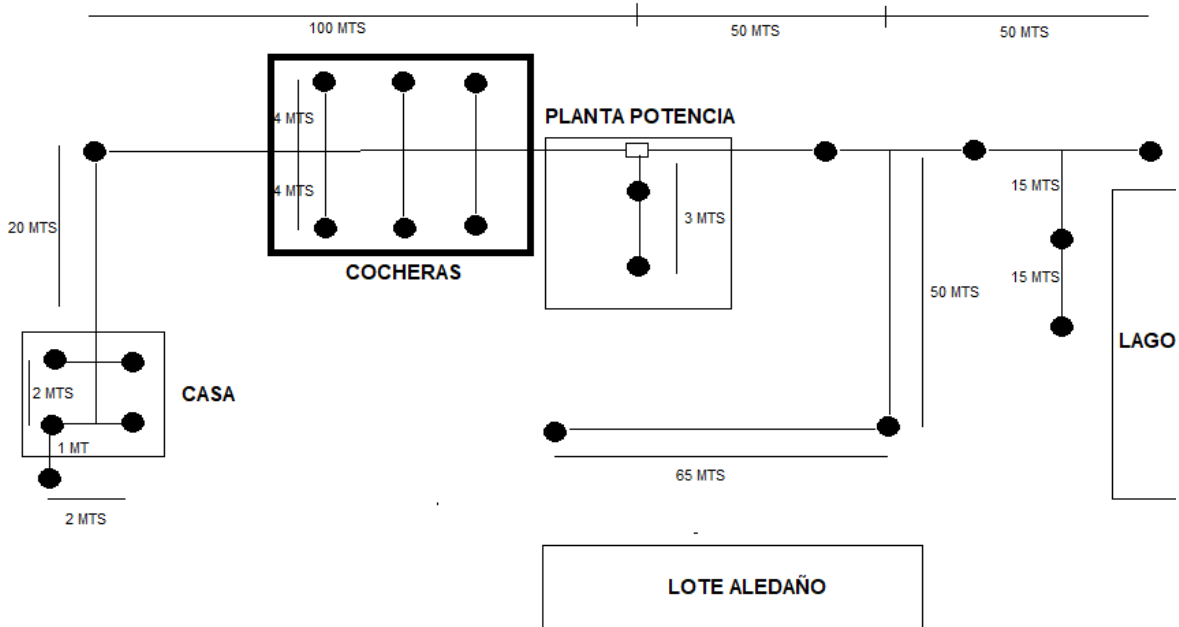
Tabla 4-8. Color de conductores

CONDUCTOR	COLOR
Fase	Negro
Neutro	Blanco
Tierra	Verde

Fuente: Elaboración propia.

Se tiene en cuenta la distancia de cada iluminaria para el cálculo de la distancia total de conductores necesarios para el sistema. Para términos de costos y la distancia de la luminaria más lejana, se calcula el calibre de los conductores teniendo en cuenta la caída mínima de tensión aceptable para circuitos de alumbrado en el punto más lejano, el cual es del 3 % (Lagunas, A 2009). En la Figura 4-8 se muestra una caracterización de todas las distancias de las luminarias del sistema.

Figura 4-8. Caracterización de luminarios



Fuente: Elaboración propia.

Se realizó una sumatoria de la distancia de los conductores necesaria para alimentar todas las luminarias ya caracterizadas anteriormente con base a las medidas mostradas en la Figura 4-8, dando como resultado una distancia total de conductores de 384 m y se determinó el punto de conexión más lejano del circuito es de 165 m.

4.7.4 Calculo de conductores por caída de voltaje

Como ya se mencionó anteriormente los conductores de línea para un circuito, se debe dimensionar de manera que la caída de voltaje no exceda el 3%.

Considerando que la tensión nominal del circuito es de 120 V y el porcentaje de caída de tensión máximo de 3 % se obtiene que la tensión nominal mínima debe ser de 116,4 V

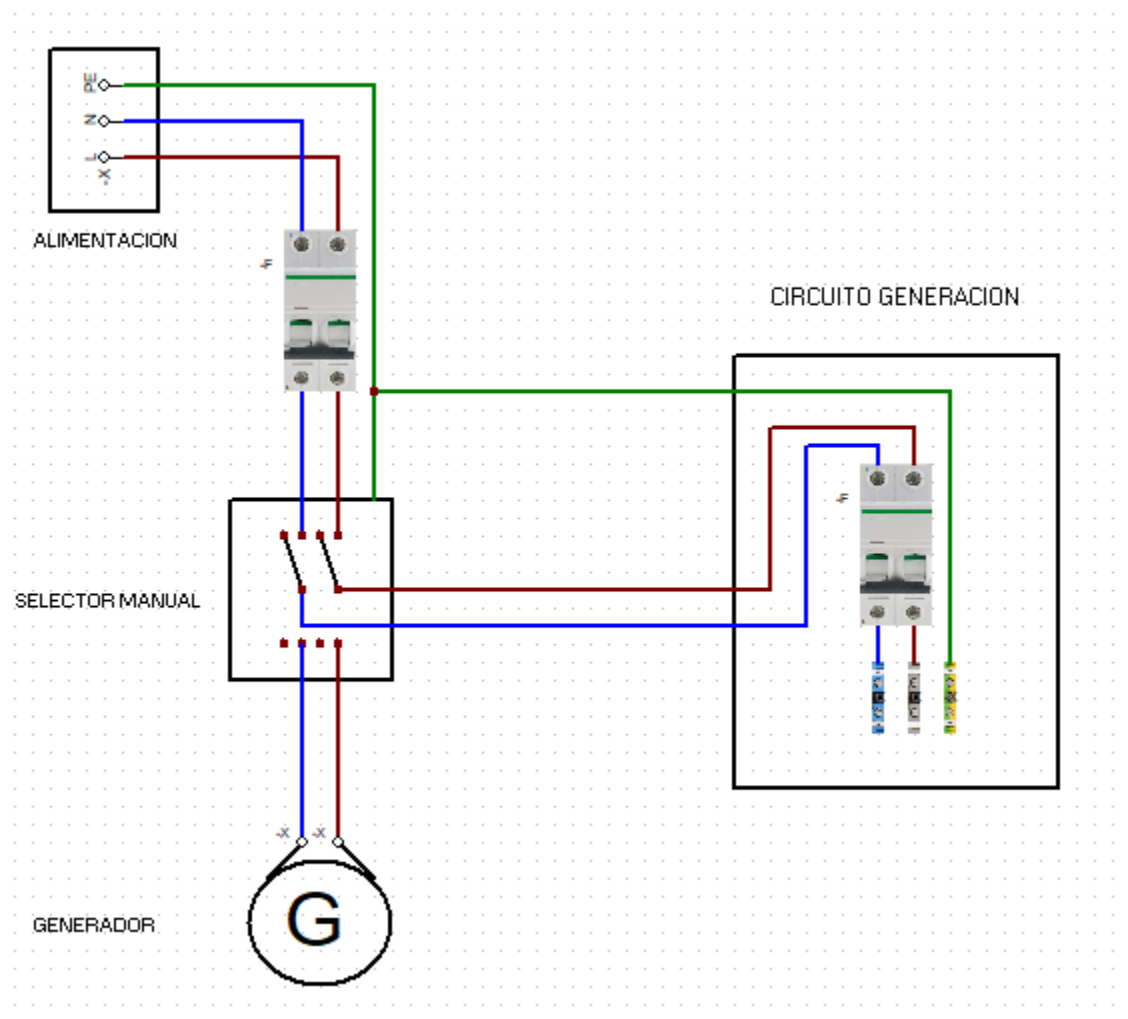
Se seleccionó como material para los conductores el cobre el cual tiene una resistividad de material de 0,0175 Tabla 2-4. Con la ecuación 2-15 se determina la sección transversal del conductor ($0,0545 \text{ mm}^2$).

Teniendo calculado el valor de la sección transversal del conductor y con los valores de la Tabla 2-5, determinamos que, con base a la sección transversal calculada, un conductor 19 AWG es el conductor de mínimo calibre que se puede utilizar para el circuito eléctrico. Se selecciona el cable 12 AWG para tener un factor de sobredimensionamiento lo suficiente amplio para que soporte una expansión futura del sistema eléctrico para el aprovechamiento de toda la energía generada.

4.7.5 Diagrama eléctrico

En la Figura 4-9 se muestra el plano eléctrico del sistema, que básicamente es una transferencia manual la cual se realiza por un interruptor de 2 polos y de 2 posiciones, una posición para alimentar el circuito con la red general y el otro para alimentarlo con la planta de generación.

Figura 4-9. Diagrama eléctrico del sistema



Fuente: Elaboración propia

4.8 Análisis económico del sistema

Con el fin de verificar la viabilidad económica y la rentabilidad de la inversión requerida para el desarrollo de este proyecto se ha considerado analizarlo a través del cálculo del

valor presente neto, para esto se debe realizar una caracterización del costo total de la inversión.

4.8.1 Caracterización de costos del sistema

Se realizó una caracterización de los costos de cada sistema de la planta de generación, con el fin de determinar el costo total de la inversión para después realizar el cálculo del valor presente neto.

En las Tablas 4-9, 4-10 y 4-11e calculó el costo de inversión de cada uno de los sistemas de la planta.

Tabla 4-9. Costos sistema eléctrico.

Costo sistema eléctrico	
Conductores	\$ 1.650.000
Interruptores automáticos	\$ 100.000
Selector	\$ 100.000
Lámparas exteriores	\$ 656.000
Generador eléctrico	\$ 3.962.460
Total	\$ 6.468.460

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-10. Costos sistema de biodigestion.

Costo sistema biodigestion	
Biodigestor	\$ 3.450.000
Tuberías	\$ 120.000
Filtros	\$ 50.000
Consumibles	\$ 200.000
Total	\$ 3.820.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-11. Costo total

Costo total	
Sistema eléctrico	\$ 6.468.460
Sistema biodigestion	\$ 3.820.000
Mano de obra	\$ 656.000
Total	\$ 10.944.460,0

Fuente: Elaboración propia.

4.8.2 Valor presente neto (VPN)

Teniendo en cuenta el potencial de ahorro energético calculado, se procede a realizar el flujo de efectivos de entrada y de salida, donde se estima para cada periodo un flujo de entrada de \$ 77.094 que es el potencial de ahorro energético de toda la energía producida por el sistema. Teniendo en cuenta que el valor de kw/h tiene una inflación del 2.5 % anual, se seleccionó una tasa de interés sobre la inversión del 5% y determinando que la vida útil del proyecto será de 8 años, que es el tiempo promedio de vida útil del biodigestor, en la Tabla 4-12 se muestra el cálculo del VPN para dichos valores de entrada y la tasa de interés.

Tabla 4-12. Calculo de valor presente neto (VPN)

Valor presente neto		
Años	Flujo de electrico	VPN
0	-\$ 10.944.460,0	-\$ 3.728.890,02
1	1.002.231	
2	1.027.287	
3	1.052.969	
4	1.079.293	
5	1.106.275	

6	1.133.932	
7	1.162.281	
8	1.191.338	
Tasa de interés	5%	

Fuente: Elaboración propia.

4.8.3 Tasa interna de retorno

Utilizando la herramienta Excel, con la función TIR, en la Tabla 4-13 se calculó la tasa interna de retorno para todos los flujos de efectivo desde el año 0 al año 8 y se obtuvo como resultado que la tasa interna de retorno para este proyecto es del el -5% una cifra muy importante al momento de determinar la viabilidad económica del diseño.

Tabla 4-13. Cálculo de la tasa interna de retorno.

Tasa Interna de Retorno		
Años	Flujo de electico	TIR
0	-\$ 10.944.460,0	-5%
1	1.002.231	
2	1.027.287	
3	1.052.969	
4	1.079.293	
5	1.106.275	
6	1.133.932	
7	1.162.281	
8	1.191.338	
Tasa de interes	5%	

Fuente. Elaboración propia.

5: Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Se efectuó el diseño de una planta de micro generación de energía a partir de biogás, para una granja ubicada en los alrededores de Guadalajara de Buga. Para esto, se determinó el potencial de producción de porcínaza de la granja a partir de número de cerdos y su etapa productiva. Luego, se estimó la cantidad de biogás que se puede extraer de dichos residuos orgánicos y posteriormente se calculó su contenido energético aprovechable. Partiendo de estos datos se calculó el biodigestor y se diseñaron los subsistemas de purificación del biogás.
- Para el cálculo del biodigestor se determinó el volumen requerido para almacenar la mezcla porcínaza-agua-biogás por 43 días, que fue el tiempo hidráulico estimado. Luego, considerando una forma cilíndrica, se determinaron sus dimensiones principales. El resultado fue un biodigestor de 1.9 m de diámetro y longitud de 9.06 m. Por último, para la construcción del digestor se seleccionó geo membrana de polietileno de 1 mm de espesor por su bajo costo y alta resistencia al agente químico.
- Posteriormente, conociendo el caudal de biogás generado ($Q = 0.18 \text{ m}^3/h$) y el material de las tuberías y accesorios (PVC), se determinaron las pérdidas de presión

en el sistema de circulación del biogás. Como estas pérdidas fueron significativamente bajas para los diferentes diámetros de tubería y accesorios considerados, se seleccionó un diámetro nominal 3/8" para reducir costos de instalación.

- El diseño de los subsistemas de purificación (trampa de agua, filtro de H₂S y sistema de absorción de CO₂), se desarrolló a partir de conceptos básicos sobre precipitación de condensados y reacciones químicas simples que no requieren de fuentes de energía externa ni de compuestos químicos de alto costo comercial. Lo que nos da una gran ventaja en costos de fabricación, simplicidad de operación y efectividad de purificación.
- Para el aprovechamiento energético del biogás purificado, se calculó el potencial de generación eléctrica del biogás en la granja. Este fue de 1200W donde solo podrá estar encendido durante 4 horas al día, debido a que el gas consumido por el generador es mayor al producido por la planta de potencia.
- Los sistemas de generación de energía eléctrica a partir de biogás son poco eficientes en granjas de baja población animal, donde no se cuentan con la materia orgánica disponible para poder alimentar a la unidad moto generadora de manera continua.
- Se diseñó un sistema eléctrico para el sistema de generación siguiendo los lineamientos del RETIE, se utilizó un selector de 2 polos y 2 posiciones para realizar la transferencia manual del sistema de potencia, esto para facilidad de operación, ya que el operario puede decidir en qué momento alimentar el sistema con la red eléctrica general.
- Se realizó un análisis económico del sistema donde utilizando la herramienta Excel se calculó el VPN y la TIR, Se seleccionó una vida útil del proyecto de 8 años y una tasa de interés del -5%, se pudo determinar que al final del ciclo de vida de la inversión se obtuvieron \$ - 3.728.890,02 de pérdida, un valor muy importante ya que se obtuvo un flujo de efectivo negativo al final del proyecto, lo que determina que al final del proyecto no se obtendrán ganancias monetarias.

- Se calculó una TIR del -5% para este proyecto lo determina que es una inversión económicamente no viable, lo que no le quita importancia al proyecto ya que es de gran importancia dar un tratamiento adecuado a los residuos agrícolas producidos por las explotaciones porcinas para minimizar el impacto ambiental de esta actividad.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda que para las granjas de baja población animal la energía proveniente del biogás sea consumida térmicamente, esto con el fin de evitar las pérdidas por transformación de la energía.
- Se puede observar que todos los equipos cotizados tienen potencia nominal por encima de la requerida. Sin embargo, esto puede ser beneficioso a mediano plazo, pues cuando la granja cumpla con el número límite de animales en sus instalaciones (130 porcinos), la capacidad de generación aumentará y será necesaria una planta más grande.
- El sistema de absorción CO_2 es de carácter exploratorio, pues en este proyecto no se evaluará la efectividad de absorción del CO_2 . Sin embargo, se deja como punto de partida para su evaluación en próximos proyectos de investigación.

Bibliografía

- Alibaba. (2020). Generador De Biogás Tamaño Familiar - Buy Generador De Biogás,Generador Eléctrico De Biogás,1.5kw 3kw 5kw Puxin Biogás Geneset Product on Alibaba.com. (n.d.). Retrieved November 21, 2020, from https://spanish.alibaba.com/product-detail/puxin-electric-start-biogas-engine-generator-1529884389.html?spm=a2700.gallery_search_cps.normalList.45.562733f74LBfVk*
- Acosta, Y. L. A. (2005). La digestión anaerobia: Aspectos teóricos. In *Icidca* (Vol. 39).
- Almanza, F. (2011). Construcción y Evaluación de un Blodigestor Modelo Chino Mejorado En Zonas Andinas. *CECADE*.
- Asociación porkcolombia. (2015). Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia. In *Minambiente* (Vol. 7, Issue 9).
- Bacon, R. (2018). El PVC (Policloruro de Vinilo). In *Facultad de Química e Ingeniería*.
- Barrero, A. (2019). *El último informe de la Agencia Internacional de la Energía denuncia las contradicciones del sistema energético global - Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias*. Energías Renovables; Panorama - El último informe de la Agencia Internacional de la Energía denuncia las contradicciones del sistema energético global - Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias.
- Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., & Levy, A. (2017). Generación de Electricidad a Partir de Biogás Capturado de Residuos Sólidos Urbanos: Un Análisis Teórico-Práctico. In *División de Energía*.
- Bruno, J. C., Hinestrosa, A., & Coronas, A. (2002). *Estado actual de la tecnología de las microturbinas de gas*.
- Chan,S. P., (2009). Fundamentos de ingeniería economica.

- Curry, N., & Pillay, P. (2012). Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment. *Renewable Energy*, 41, 200–209.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.10.019>
- Cusi, J. (2018). *Diseño y construcción de un sistema de producción de energía eléctrica para la generación de 800 W a través del uso de biogás, para una pequeña granja y análisis energético del sistema*. Escuela Politécnica Nacional.
- Durman. (2011). *Geomembrana de polietileno.pdf*.
- EFE. (2019). *La agricultura es responsable del 23% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero*. EL TIEMPO.
- Enel codensa. (2020). *Tarifas de energía eléctrica*.
- Escardó, A. L. (2001). Clima y cambio climático. *Revista Del Aficionado a La Meteorología*, 10(3), 10. <https://doi.org/10.7818/re.2014.10-3.00>
- Ezquen Zamora, J. (2018). *Diseño De Un Sistema De Generación De Energía Eléctrica Utilizando El Biogás Obtenido De La Conversión Del Estiércol De Ganado Porcino En La Granja Mocupe, Distrito De Lagunas – Chiclayo*.
- FAO, MINENERGIA, PNUD, & GEF. (2011). Manual del Biogás. In *Proyecto CHI/00/G32*.
- Figueroa, Y. (2018). *Modelización y análisis de una microturbina de gas con gas natural y biomasa como combustibles*. Universidad Politécnica de Madrid.
- G. Garrido, S. (2011). Especial: Turbinas de Gas. In *Renovetec*.
- Gases del pacífico. (2014). *DIMENSIONAMIENTO DE CONFIGURACIONES DE INSTALCIONES INTERNAS TÍPICAS DE GAS NATURAL PARA CONSUMOS MENORES A 300 m³ / mes*.
- Genzor, I. (2011). Simulación CFD de la etapa de turbinado de un motor a reacción. In *Universitat Politecnica de Catalunya*. Universitat Politecnica de Catalunya.
- Giraldo, R., & Trujillo, J. (1994). *Estudio de un grupo electrogeno*. Corporación Universitaria Autónoma de occidente.
- Gon, L. M. I. (2008). *Guía para proyectos de biodigestión en establecimientos agropecuarios*.
- Guardado, J. (2007). *Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas* (A. Montesinos & L. Tagle (Eds.); CUBASOLAR).

- IDAE. (2017). *Biogás*. Tecnologías Renovables.
- Marcelo, M., Alamo, M., & García, R. (2017). DISEÑO DE UN BIODIGESTOR TUBULAR PARA ZONAS RURALES DE LA REGIÓN PIURA. *XXIV Simposio Peruano de Energía Solar y Del Ambiente*, 13–17.
- Marszałek, M., Kowalski, Z., & Agnieszka, M. (2014). Physicochemical and Microbiological Characteristics of Pig Slurry Fizykochemiczna I Mikrobiologiczna. *Technical Transactions, Chemistry*, 81–91.
- Mercedes, Y., Morales, R., & Hernández Guzmán, A. (2014). Caracterización De Un Motor De Combustión Interna Con Dos Tipos De Combustible. *Imt - Sct*, 417(417), 1–85.
- Minenergía. (2012). *Guía de planificación para proyectos de biogás en Chile* (GIZ (Ed.)). Proyecto de energías renovables.
- Ministerio de Minas Y Energía. (1972). ATLAS DEL POTENCIAL ENERGETICO DE LA BIOMASA RESIDUAL EN COLOMBIA. In *Mar Eng Nav Architect* (Vol. 95, Issue 1155).
- Ministerio de producción: Gobierno de la Pampa. (2001). *Instalaciones para producción porcina*.
- Morales, N. (2011). *Medida de Resistividad de Terreno Indice*. 1–22.
- Naciones Unidas. (2019). *Cambio climático*. Global Issues.
- Olaya, Y. (2009). FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES. In *Facultad de ingeniería y administración*. Univerisad Nacional de Colombia.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019). *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores*.
- Pedraza, G., Chará, J., Conde, N., Giraldo, S., & Giraldo, L. (2002). *Evaluation of polyethylene and PVC tubular biodigesters in the treatment of swine wastewater*. CIPAV.
- Rangel, Ó. (2018). *Análisis de situación de salud con el método de determinantes sociales*.
- Ríos, I. M. (2017). *Producción de pellets de cascarilla de arroz con máximo contenido energético*. Universidad Autónoma de Querétano.
- Rivas Solano, O., Faith Vargas, M., & Guillén Watson, R. (2010). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Tecnología En Marcha*, 23(1), 39–46.
- Rodríguez, T., & Violeta, M. (2018). *Separación y captura de CO 2 mediante una membrana zeolítica*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- S'2- vkw Nacional de Aprendizaje SENA Subdi. (1977). 5.
- SEMARNAT. (2010). Especificaciones Técnicas para el Diseño y Construcción de Biodigestores en

- México. *Firco*, 103.
- SENA. (2008). *El biodigestor plástico familiar* (p. 19).
- SERRATO, C. C., & LESMES, V. (2016). *Metodología para el cálculo de energía extraída a partir de la biomasa en el departamento de Cundinamarca*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Tabla-de-equivalencias-AWG-a-MM2.pdf*. (n.d.).
- Vaca, M., Torres, G., Renzoni, T., Gómez, I., Ríos, L. D., Ruber, L., Flórez, Lady, & Rodríguez, D. (2012). *La caliza en Colombia*. Servicio Geológico Colombiano.
- Vivas, J. (2017). *Los lugares que aún viven sin energía eléctrica en Colombia*. EL TIEMPO.
- Weather Spark. (2020). *Clima promedio en Buga*.