

**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
VICERRECTORADO
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EXTENSIÓN AGRÍCOLA Y POSGRADO
INGENIERÍA AGRONÓMICA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA DE GAS Y
PETROQUÍMICA
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIOABONOS, GAS
METANO (CH₄) Y APROVECHAMIENTO EN LA
GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD**

PROYECTO FINANCIADO CON RECURSOS PROPIOS

RESOLUCIÓN HCC No. 157/2020

RESOLUCION HCC No. 130/2020

RESOLUCION HCCIE No. 036/2020

EQUIPO DE INVESTIGADORES

Ing. MSc. Rogelio Maydana Apaza
Ing. MSc Marion Rosy Gareca Quispe
Ing. MSc Héctor Antonio Uriarte Peláez

Univ. Eliu Misael Dueñas Chavez
Univ. Blanca Nieves Ulo Ortega
Univ. Franklin Edgar Canaza Trujillo
Univ. Sergio Carlos Condori

**EL ALTO – BOLIVIA
2021**

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO

AUTORIDADES

Dr. Carlos Condori Titirico
RECTOR

Dr. Efrain Chambi Vargas
VICERRECTOR

Dr. Antonio López Andrade Ph. D.
DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Ing. Laoreano Coronel Quispe
DECANO ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

Ing. Roger Omar Llanque Villavicencio
DECANO ÁREA DE INGENIERÍA DESARROLLO TECNOLÓGICO PRODUCTIVO

Ing. Daniel Condori Guarachi
DIRECTOR DE CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

Ing. German Bravo Choque
DIRECCIÓN DE CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Ing. Wily Ricardo Luque Acho
DIRECTOR DE CARRERA DE INGENIERÍA DE GAS Y PETROQUÍMICA

Ing. Edwin Guarachi Laura
COORDINADOR INSTITUTO DE INVESTIGACION EXTENSION AGRICOLA Y POSGRADO - INGENIERÍA AGRONÓMICA

Ing. Moisés Montesinos Pomier
COORDINADOR INSTITUTO DE INVESTIGACIONES INGENIERÍA ELÉCTRICA

Ing. M.Sc. Elma Roció Córdova Quispe
COORDINADOR INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE GAS Y PETROQUÍMICA

PRESENTACIÓN

La universidad Pública de El Alto (UPEA), institución de formación académica y recursos humanos sobre todo del conocimiento como factor del desarrollo, se encuentran en el centro del análisis, ya que es importante el capital humano con conocimientos técnicos y científicos, como apoyo al desarrollo del país, que mediante la investigación puede acelerar los procesos de crecimiento y desarrollo tecnológico.

Ante la necesidad de impulsar el desarrollo tecnológico industrial en la producción agrícola y pecuaria, las carreras de Ingeniería Agronómica, Gas y Petroquímica e Ingeniería Eléctrica de la Universidad Pública de El Alto, instituciones encargados de promover innovaciones tecnológicas, al servicio de la sociedad, buscando el bienestar de las familias Bolivianas mediante el uso de las Energías Alternativas; de acuerdo a los objetivos planteados, se realizó el diseño de biodigestor para la producción de bioabonos, gas metano, así como los cálculos y el respectivo diseño del sistema de generación de electricidad.

Es necesario reconocer los aportes de docentes y la participación de los estudiantes en su etapa inicial de la parte teórica y llevar posteriormente en la elaboración del proyecto a diseño final, para que sean promovidos por instituciones públicas y privadas a nivel Nacional, Departamental y Municipal.

Ing. Edwin Guarachi Laura
COORDINADOR
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN, EXTENSIÓN
AGRÍCOLA Y POSGRADO INGENIERÍA AGRONÓMICA

Ing. Moisés Montesinos Pomier
COORDINADOR
INSTITUTO INVESTIGACIONES DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA

Ing. M.Sc. Elma Roció Córdova Quispe
COORDINADOR
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE GAS Y PETROQUÍMICA

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

A nuestra Casa Superior de Estudios Universidad Pública de El Alto (UPEA), por darnos la oportunidad de contribuir con nuestros conocimientos técnicos y científicos en el diseño del Biodigestor para la producción de bioabonos, Gas metano (CH₄) y aprovechamiento en la Generación Eléctrica, lo cual será de mucha utilidad para la implementación del proyecto en instituciones públicas y privadas.

De la misma manera agradecer a los Directores de las Carreras de Ingeniería Agronómica, Gas y Petroquímica e Ingeniería Eléctrica: así como a los Coordinadores de Investigación de las mencionadas Carreras, por habernos apoyado en la labor y ejercicio como docentes investigadores y permitirnos desarrollar actividades de investigación en la elaboración y conclusión exitosa del proyecto de investigación.

Ing. MSc. Rogelio Maydana Apaza
DOCENTE INVESTIGADOR
IINEAP - INGENIERÍA AGRONÓMICA

Ing. MSc Marion Rosy Gareca Quispe
DOCENTE INVESTIGADOR
IIGP – INGENIERÍA GAS Y PETROQUÍMICA

Ing. MSc. Héctor Antonio Uriarte Peláez
DOCENTE INVESTIGADOR
IIIE - INGENIERÍA ELÉCTRICA

RESUMEN

La contaminación ambiental que ocasionan los combustibles fósiles, se ve ampliado por la producción descontrolada de residuos sólidos urbanos (RSU), que crece debido a la economía de consumo y a los desarrollos tecnológicos creando la necesidad de gestionarlos y utilizarlos sosteniblemente luego de su producción. Como institución académica de formación es responsabilidad nuestra proponer proyectos que vaya en respuesta a problemáticas ambientales, sociales, energéticas, entre otras. Es en este sentido que las Carreras de ingeniería de Agronomía, Ingeniería de Gas y Petroquímica e Ingeniería de Eléctrica, proponen el siguiente “Diseño de un Biodigestor para la Producción de Bioabonos, Gas Metano (CH_4) y Aprovechamiento en la Generación de Electricidad”.

El presente proyecto está compuesto de seis capítulos los cuales dan una introducción del proyecto; sustentan metodológicamente en base a experiencias de trabajos anteriores referentes a la temática; desarrollan conceptualmente todas las definiciones del proceso de biodigestión y parámetros que se involucran en el proceso; para proponer un Capítulo de Resultados donde se encuentra todo el diseño de la propuesta, describiendo partes y accesorios que componen el biodigestor, arreglo de filtros para la limpieza y obtención del biometano y el motor para la generación de energía eléctrica; por último, las conclusiones del proyecto.

El biogás obtenido de los RSU, es posible su aprovechamiento mediante combustión, quemándolo y transformándolo en energía eléctrica mediante motores de combustión interna que sustituyen a los combustibles fósiles tradicionales. En el presente trabajo, se analiza el aprovechamiento de los recursos biomásicos en forma de biogás, su purificación y posterior utilización para la generación de energía eléctrica y una vez determinada la cantidad de biogás, se realiza la analogía con un estimado de concentración de CH_4 , del 60%, a la cantidad de kWh que se obtendría. Con este dato teórico se escoge el sistema de generación más adecuado en función de las características químicas del Biogás los parámetros técnicos en bornes del generador de energía eléctrica y las características químicas del Biogás.

ABSTRACT

The environmental pollution caused by fossil fuels is amplified by the uncontrolled production of urban solid waste (USW), which grows due to the economy of consumption and technological developments creating the need to manage and use them sustainably after their production. As an Academic Institution, it is our responsibility to propose projects that respond to environmental, social, energy and other problems. It is in this sense, the Careers: Agronomy Engineering, Gas and Petrochemical Engineering and Electrical Engineering, propose the following "Design of a Biodigester for the Production of Bio-Fertilizers, Methane Gas (CH₄) and Use in the Generation of Electricity".

This project is composed of six chapters which give an introduction to the project; methodologically support based on experiences of previous works on the subject; conceptually develop all the definitions of the biodigestion process and parameters that are involved in the process; to propose a Results Chapter where the entire design of the proposal is found, describing parts and accessories that make up the biodigester, filter arrangement for cleaning to obtain biomethane and the motor for generating electricity; finally, the conclusions of the project.

The calorific power of biogas obtained from USW, it is possible to use it by combustion, burning it and transforming into electrical energy using internal combustion engines that replace traditional fossil fuels. In the present work, the use of biomass resources in the form of biogas, its purification and subsequent use for the generation of electrical energy is analyzed and once the amount of biogas has been determined, the analogy is made with an estimate of the concentration of CH₄, 60%, to the amount of kWh that would be obtained. With this theoretical data, the most appropriate generation system is chosen based on the chemical characteristics of the Biogas, the technical parameters on the electrical power generator terminals, and the chemical characteristics of the Biogas.

ÍNDICE

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
1. El problema	1
2. Formulación del problema	3
3. Objetivo	3
3.1. Objetivo general	3
3.2. Objetivos específicos	3
4. Justificación	4
5. Hipótesis	5
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	6
1. Mención de otros estudios relacionados al tema	6
2. Mención de los puntos de vista de otros investigadores	9
3. Corriente o enfoque elegido por los investigadores	14
4. Identificación de fuentes	15
CAPÍTULO III: MARCO CONCEPTUAL	19
1. Biodigestor	19
1.1. Partes de un biodigestor	19
1.2. Condiciones para la biodigestión	19
2. Digestión anaeróbica	20
2.1. Procesos de biodigestión anaeróbica	21
2.1.1. Hidrólisis	21
2.1.2. Acidogénesis	22
2.1.3. Acetogénesis	22
2.1.4. Metanogénesis	22
3. Microorganismos que influyen en la digestión anaeróbica	
Bacterias que participan en la hidrólisis	24
3.2. Bacterias que participan de la acidogénesis	24
3.3. Bacterias que participan de la acetogénesis	25
3.4. Bacterias que participan de la metanogénesis	25
3.5. Especies metanotróficas	25
4. Factores que influyen en la biodigestión	25
4.1. Tipo de materia prima	26
4.2. pH	28

4.3.	Temperatura	28
4.4.	Nutrientes	29
4.5.	Potencial redox	30
4.6.	Tiempo de retención hidráulico y velocidad de carga orgánica	30
4.7.	Agitación	31
4.8.	Sustancias inhibidoras	32
4.9.	Relación Carbono / Nitrógeno	33
5.	Sólidos orgánicos	34
5.1.	Residuos orgánicos	34
5.2.	Productos de biodigestión	35
5.2.1.	El biol	35
5.2.1.1.	Ventajas del biol	35
5.2.2.	Bioabono	36
5.2.2.1.	Ventajas de la aplicación de Bioabono	38
6.	Biogás	39
6.1.	Rendimiento de biogás por tipo de biomasa	40
6.2.	Composición y características	41
6.3.	Diferencias entre el biogás y el gas natural	41
6.4.	Poder calorífico del biogás	42
6.5.	Acondicionamiento del biogás	43
6.5.1.	Remoción del dióxido de carbono (CO ₂)	45
6.5.2.	Remoción de H ₂ S	45
6.5.3.	Remoción de trazas de gases	47
6.5.4.	De biogás a biometano	47
6.6.	Generación de electricidad	49
6.6.1.	El Sistema Interconectado Nacional (SIN)	51
6.6.2.	Las Centrales Eléctricas	53
6.6.3.	Generación de Electricidad	54
6.6.4.	El Alternador Eléctrico	57

CAPÍTULO IV: MARCO METODOLÓGICO	59
1. Tipo de investigación	59
2. Diseño de la investigación	59
3. Técnicas e instrumentos	59
4. Procedimientos de la investigación	59
CAPÍTULO V: RESULTADOS	61
1. Diseño del biodigestor, filtros para limpieza de biogás y turbina para la generación de energía eléctrica	61
1.1. Diseño del biodigestor	61
1.1.1. Partes del diseño del biodigestor	63
1.1.2. Descripción del material de construcción del biodigestor	65
1.2. Diseño de filtros para la limpieza de biogás y obtención de biometano	68
1.2.1. Descripción de los componentes para la limpieza de biogás y obtención de biometano	73
1.2.2. Ponderación de resultados	77
1.3. Diseño de la Turbina o Motor a Combustión y el Alternador para la Generación de Energía Eléctrica	78
1.3.1. Consideraciones respecto al sistema elegido para la generación de energía eléctrica	78
1.3.2. Descripción de los equipos y materiales componentes del generador de energía eléctrica	84
2. Costos	86
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	89
CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXOS	97

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Parámetros presentes en las etapas principales de degradación	22
Cuadro 2. Condiciones óptimas para el crecimiento de metanógenos	22
Cuadro 3. Bacterias que participan durante las cuatro fases de la digestión anaeróbica	22
Cuadro 4. Principales géneros de bacterias que han sido aislados de ambientes metanógenos	24
Cuadro 5. Rendimiento de materia prima empleada	26
Cuadro 6. Composición y rendimiento de biogás de diferentes materias primas	27
Cuadro 7. Cantidad de estiércol producido por distintos tipos de animales	28
Cuadro 8. Rangos óptimos de pH para los diferentes microorganismos	28
Cuadro 9. Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica	29
Cuadro 10. Tiempo de retención según la temperatura	31
Cuadro 11. Concentración inhibidora de inhibidores comunes	33
Cuadro 12. Relación C/N de residuos animales	34
Cuadro 13. Composición de Biol de diferentes fuentes	36
Cuadro 14. Resultados de la comparación de medias por el método de t student	37
Cuadro 15. Rendimiento de biogás por tipo de biomasa	41
Cuadro 16. Características del biogás	42
Cuadro 17. Equivalente de energía: biogás y otros combustibles	42
Cuadro 18. Comparación entre las propiedades del biogás y el gas natural	43
Cuadro 19. Comparativa de Gas Natural y Biometano	47
Cuadro 20. Contaminantes y tratamiento del biogás para la obtención	48
Cuadro 21. Materiales de construcción de un biodigestor	64
Cuadro 22. Materiales y componentes para el proceso de limpieza de gas.	74
Cuadro 23. Componentes del proceso de filtros y limpieza	75
Cuadro 24. Ponderación sobre la concentración de gases en el biogás obtenido	78
Cuadro 25. Características principales de micro turbinas, operando en ciclo simple.	80
Cuadro 26. Características principales de los motores de combustión interna cuando operan en ciclo simple.	81
Cuadro 27. Equipos y materiales del generador de energía eléctrica	86
Cuadro 28. Detalle de costos para el biodigestor	87
Cuadro 29. Detalle de costos para el biodigestor	88
Cuadro 30. Detalle de costos para generación de electricidad	89
Cuadro 31. Resumen de Costos.	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura1. Esquema de Producción de Biogás	21
Figura 2. Ciclo biológico del biogás	40
Figura 3. Rendimiento potencial de biogás por tipo de biomasa	41
Figura 4. Sistema Interconectado Nacional (SIN) Bolivia	52
Figura 5. Esquema del motor ciclo Otto.	55
Figura 6. Esquema del motor ciclo Diesel.	56
Figura 7. Esquema de micro turbina.	57
Figura 8. Esquema generador C.A.	58
Figura 9. Diseño del biodigestor	62
Figura 10. Diseño del biodigestor con corte vertical.	63
Figura11. Arreglo de limpieza de H ₂ S.	69
Figura 2. Arreglo de limpieza de CO ₂ .	70
Figura 13. Diagrama de condensación.	72
Figura 14. Diagrama del acumulador de biometano.	73
Figura 15. Detalle constructivo del motor a combustión interna (ciclo otto).	83
Figura 16. Detalle constructivo del alternador.	84
Figura 17. Sistema de generación de electricidad.	85
Figura 18. Ejemplo de un tablero eléctrico	86

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1. El problema

El incremento de la acumulación de residuos sólidos y los problemas originados por su falta de gestión y manejo inadecuado, han afectado al medio ambiente produciendo una contaminación ambiental. Con la transformación de las actividades humanas, los residuos sólidos no sólo representan un problema por su cantidad, sino también por la heterogeneidad en su composición y su mal manejo se refleja en la contaminación de suelos, del aire, de las aguas superficiales y/o subterráneas y también en la salud a consecuencia de la infiltración de líquidos contaminados hacia cuerpos de agua que son empleados para consumo humano, animal o vegetal y la emisión de gases, producto del proceso de descomposición de la materia orgánica incrementando el efecto invernadero.

La basura, cuyo nombre técnico es residuo sólido, es la mezcla de los materiales sólidos que en la mayoría de los casos los seres humanos consideran inservibles, como ser la materia orgánica e inorgánica, esta acepción no comprende la utilidad o el valor de los recursos aprovechables que contienen como materia prima para otras actividades productivas, tales como el compostaje, producción de biogás, biol, fertilizantes, generación de electricidad y otros procesos similares.

Según el INE (2017) la recolección de residuos sólidos en las ciudades capitales de los departamentos del país y El Alto llegó a 1.426.988 toneladas el 2016, registrando incremento de 576.257 toneladas en 10 años, de acuerdo a información de los Registros Administrativos de las Empresas Municipales de Aseo.

En Santa Cruz se recolecta 558.229 toneladas residuos sólidos, en La Paz 212.554 toneladas y en la ciudad de El Alto 216.836 toneladas. La cantidad de residuos sólidos se distribuye de la siguiente manera: residencial con 1.185.712 toneladas, mercados con 139.799 toneladas, industria y mataderos con 61.312 toneladas, áreas públicas con 28.854 toneladas y hospitales con 11.311 toneladas.

Además, según datos del Censo de Población y Vivienda del 2012, citado por Gonzales. A. (2019) *“poco menos del 60% de los hogares desechan su basura en un contenedor o*

mediante el servicio público de recolección, el restante lo eliminan de formas alternativas, como ser: quema, la botan al río o algún terreno baldío o la entierran”.

Es por lo tanto una necesidad imperante evaluar alternativas que permitan la disminución de la contaminación con desechos orgánicos e inorgánicos generando de esta manera el Biol, que es un fertilizante que contribuye la producción del metano el cual es un gas que es más limpio que todos los combustibles el cual ayuda a mejorar la calidad de agua y aire.

El gas natural que está compuesto de hasta el 97% de metano, en el país está destinado al consumo y la distribución en las categorías: comerciales, domesticas, industrial y a las estaciones de servicio como GNV. De acuerdo a YPFB (2015), Bolivia había alcanzado la conexión número 500.000 de gas domiciliaria en todo el territorio nacional entre los periodos de 2006 a 2014, lo que indica que 2.5 millones de usuarios gozan del servicio de gas las 24 horas del día los 365 días del año. Según reportes de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), para el primer semestre del 2018 la comercialización de gas natural en el país se incrementó en un 3.7 %, este crecimiento se dio principalmente por el aumento del consumo de Gas Natural Vehicular (GNV) que llego a 5.545 millones de pies cúbicos (MMPC).

De acuerdo a Medinacelli (2019) en su blog, *“muestra una proyección del consumo del gas natural del mercado interno para la gestión 2025 de 610 MMPCD, para cubrir con gas natural a los domicilios, industrias, comercios y parque automotor. Esta necesidad de combustible nos lleva a preguntarnos si las reservas de gas serán suficiente para cubrir esta demanda y las futuras necesidades de combustible principalmente Gas Natural”.*

Para salir de la dependencia del consumo de energía fósil en imprescindible encontrar otras fuentes sostenibles de energía para cubrir el tipo de matriz energética con la que cuenta Bolivia. Recordemos que hace aproximadamente dos décadas la política gubernamental estaba orientada a cambiar la matriz energética de consumos de GLP a Gas Natural y de gasolina a Gas natural Vehicular en caso del parque automotor.

La necesidad de buscar otra fuente de combustible como el gas nos lleva a analizar las fuentes no convencionales de obtención de metano, como es el caso de la digestión del material orgánico para obtener biogás.

La producción del biogás dependiendo de la fuente de obtención será no solo una solución para cubrir con la demanda de Gas Natural, en el caso de considerar fuentes como desechos orgánicos para producir biogás, esto también mitigara de alguna medida el problema de contaminación ambiental que tiene diferentes efectos negativos en la sociedad y el planeta en su conjunto.

2. Formulación del problema

Una vez expuesto el planteamiento del problema, se formula las siguientes interrogantes:

¿Es posible plasmar un biodigestor de desechos orgánicos que produzca bioabono y gas metano?

¿Es posible diseñar un biodigestor de desechos orgánicos que produzca suficiente gas metano para producir electricidad?

¿Cómo comprobamos la producción de biogás en las condiciones ambientales locales para contribuir con el abasteciendo de gas metano para la actual y futura demanda de Gas natural?

3. Objetivo

3.1. Objetivo general

Diseñar un biodigestor para producir bioabono y gas metano (CH₄) para su aprovechamiento en la generación de energía eléctrica.

3.2. Objetivos específicos

- Crear un biodigestor modelo con parámetros y componentes eficientes para la producción de bioabonos, gas metano y generación de energía eléctrica.
- Proponer un diseño adecuado de los filtros de dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y agua para aumentar el poder calorífico de la corriente de gas de salida del biodigestor
- Diseñar un generador de electricidad adecuado al gas metano obtenido (que debe presentar características de sostenibilidad)

- Calcular la utilidad funcional del generador a partir de los parámetros internos del alternador
- Identificar los parámetros obtenidos en bornes del alternador en función de diferentes niveles de carga eléctrica.

4. Justificación

La presente investigación va a tratar de solucionar dos importantes problemas en la actualidad, la exagerada acumulación de desechos sólidos responsables de numerosas enfermedades, además de subir los niveles de contaminación ambiental, y por otro lado promover la utilización de otras fuentes energéticas diferentes de las tradicionales. Con este trabajo se pretende reducir la acumulación de basura, mediante un sistema que a la vez trae el beneficio de servir para generar energía eléctrica.

La matriz energética de Bolivia en la actualidad se basa en la producción y consumo de energía fósil, más específicamente en el consumo de Gas Natural. En las zonas urbanas la población utiliza el gas natural para cocinar sus alimentos, calefacción y agua caliente (consumo doméstico) por otro lado, el parque automotor en la última década ha tenido un cambio de matriz energética impulsado por el gobierno de manera gratuita transformado de gasolina a GNV (Gas Natural Vehicular) que se trata de gas natural a mayor presión. Bajo estos lineamientos no es difícil deducir que en un futuro cercano el Gas Natural en Bolivia vaya tener una mayor demanda para cubrir la necesidad nacional de energía.

Los elementos obtenidos en base al tratamiento de material orgánico en desuso son el bioabono, fertilizantes sólidos y líquidos, y el biogás, que es producido a partir de la biofermentación anaerobia de la materia orgánica.

La producción de alimentos en el mundo debe ser mejorada y un componente para este desarrollo es la utilización de bioabono, fertilizantes tanto sólidos y líquidos obtenidos a partir de los residuos sólidos, que es natural y mejora fuertemente el rendimiento de las cosechas.

El biogás constituye una parte muy importante en el conjunto de procedimientos aplicados a la generación de energía limpia, el cuidado del medioambiente y la disminución de

emisiones Gases de Efecto Invernadero, en los últimos años se ha convertido en una de las alternativas más atractivas.

Es importante que las universidades experimenten y den a conocer sobre alternativas de generación bioabono y de energía de fuentes no convencionales, promoviendo el reciclaje y cuidado del medio ambiente. El presente proyecto tiene la finalidad de construir un biodigestor operativo a donde se pueda analizar parámetros ambientales que tengan efecto en la producción de abono y biogás considerando fuentes de residuos orgánicos locales, esto para demostrar el beneficio y la importancia del biogás en la matriz energética y en el socioeconómico local.

5. Hipótesis

El proyecto de investigación es diseñar Biodigestor para la producción de bioabonos, Gas metano (CH_4) y aprovechamiento en la generación de Electricidad, por lo que no se planteó la formulación de hipótesis.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

1. Mención de otros estudios relacionados al tema

En el presente capítulo se hacen referencias a los diferentes autores que realizaron trabajos de investigaciones en biodigestores para producir bioabono y gas metano (CH_4) para su aprovechamiento en la generación de energía eléctrica, como se puede detallar a continuación.

El trabajo denominado “ Biodigestores de escala a 50 litros, una solución para la producción de gas, abono aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos” con este trabajo se pretende establecer el comportamiento de las diferentes cantidades de biomasa en los prototipos elaborados; con esto busca la optimización de los mismos para ser usados en las zonas rurales y así poner a funcionar el biodigestor eficazmente para la producción del gas y del abono, como fertilizante para los cultivos agrícolas. ZEA et al., (2015).

Según la tesis de grado denominado “Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor tipo piloto para la obtención de biogás y bioabono a partir de la mezcla de estiércol vacuno y suero de queso” el trabajo realizado compone de un tanque de polietileno de 80 cm de altura y 60 cm de diámetro. La instalación se cubrió la parte superior con su respectiva tapa se adición con una vincha para que el tanque este herméticamente cerrado y no escape el gas. Dispone una salida lateral y una entrada lateral y una salida en la parte inferior del tanque controlado por llaves de paso y accesorios, también dispone de un eje mezclador y paletas de acero inoxidable, y en la parte inferior del tanque dispone de un termostato para el control de la presión y temperatura. Donde se realizó una mezcla de 50% de suero de leche y el otro 50% de estiércol vacuno donde se obtuvo un rendimiento de biogás de 86.73% a una temperatura de 30 a 37°C. Narvaez y Saltos (2007).

La tesis de grado denominado “Diseño de un biodigestor domestico para el aprovechamiento energético para el aprovechamiento energético del estiércol ganado”, en esta investigación se dimensiona una instalación de un biodigestor que permita satisfacer la demanda energética diaria para la cocción de alimentos e iluminación en el cual se describe la digestión anaeróbica, los principales factores que influyen así como las características de la materia orgánica los diferentes tipos de biodigestores domésticos y se hace una descripción de los parámetros de un biodigestor. Arrieta (2016).

El artículo científico denominado “Diseño e implementación de una planta piloto de producción de Biogás, Biol y Biosol” Dos de los principales gases que producen el Efecto Invernadero, CO₂ y CH₄, proceden de la fermentación, natural o acelerada, de la materia orgánica de muchos productos o residuos. Al conjunto de ambos gases se le conoce como "biogás" que, si bien posee un efecto negativo para el clima, también posee una característica energética positiva debida al CH₄. Por ambas cosas, es de gran interés el estudio y análisis sistemático de todos los aspectos que rodean a la generación y utilización del biogás, porque se evita un daño ambiental, por la energía renovable que se produce, por la gran cantidad que se puede generar y porque sustituye a otros gases (no energéticos) que se hubieran formado, si la materia orgánica se hubiera procesado de otra forma (digestión aeróbica, combustión). El presente trabajo tuvo como objetivo el diseño e implementación de una planta piloto de biogás, biol y biosol. León et al., (2019).

La revista centro azúcar denominado “Diseño y construcción de un digestor para la generación de biogás y fertilizante orgánico” en este trabajo se muestran resultado en construcción de una planta de biogás de cúpula fija para el tratamiento de los residuos porcinos a través de la digestión anaerobia. Se describe la metodología para el cálculo de dimensiones de biogás, el cual permite procesar 200kg/día excretas, con los cual de obtienen 6,1 m³ /día de biogás y 3,4 t/año de abono orgánico. El biogás se utiliza para la cocción de alimentos con lo cual se sustituye el uso de la leña y el gas licuado de petróleo (GLP), con el abono orgánico producido cada mes se fertilizan 0,72 ha/año de tierra cultivable, con lo cual se protegen los suelos y se le restituye la fertilidad a los mismos. Se ha estimado como un incremento de la producción agrícola en un 10% resultado del uso de un biofertilizante, especialmente para los vegetales, en otros cultivos ha sido inferior. Nuñez (2015).

Otro trabajo realizado por la Universidad Nacional del Litoral con el título “Purificación de Biogás con Tecnologías de Producción Limpias” tiene por objetivo analizar la purificación con el propósito de elegir un proceso adecuado para su aplicación local, teniendo en cuenta la diversidad de fuentes, la escala de operación y el uso Morero (2014). El estudio se realiza a través de una simulación de procesos, experimentos de equilibrio de fases entre el biogás y los solventes analizados y estudio de los parámetros de operación de cada proceso.

El artículo científico “Tecnologías Disponibles para la Purificación de Biogás Usado para la Generación de Electricidad” escrito por Varnero et al., (2012), de la Universidad de Chile Facultad de Ciencias Agronómicas y Facultad de Ciencias, analizan los métodos de

“DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOABONOS, GAS METANO (CH₄) Y APROVECHAMIENTO EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

purificación físicas, químicas y biológicas, encontrando esta última como una alternativa atrayente por el bajo costo y la generación de menos contaminantes ambientales.

El artículo científico escrito en inglés “Biogas purification performance of new water scrubber packed with sponge carriers” [Rendimiento de purificación de biogás de un nuevo depurador de agua con portadores de esponja], estudia la tecnología de lavado con agua aplicado en la purificación de biogás para obtener gas útil, esta técnica se basa en incorporar esponjas en lugar de empaques convencionales generando un mayor tiempo de retención hidráulico para que el contaminante tenga más tiempo de reacción y el biogás salga más limpio.

En la Revista Energy &Fuel, un artículo elaborado por Nie et al., (2013) realizan un trabajo de comparación entre de lavado con agua y carbonato de propileo para el proceso de mejora del biogás, realizan el diseño experimental del proceso en tres etapas, en la primera parte, realizan la prueba de lavado con agua dulce para eliminar la influencia de la descomponían completa, para la absorción de carbonato de propileo, se realizaron experimentos de ciclos para reducir el desperdicio de la materia orgánica. En la segunda parte del experimento manejan diferentes proporciones de relación liquido – gas y, por último, la influencia de H₂S en la eficiencia de descarburación fue investigado mediante la alimentación de biogás que contiene diferentes concentraciones de H₂S esto les ayudo a identificar el cómo varia la eficiencia respecto de la concentración de H₂S en el biogás.

Los generadores eléctricos alimentados por combustión de biomasa son relativamente nuevos, la revisión de fuentes indican que los más antiguos se registraron en 1998 cuando H. Vogel y S.Kedrrers publicaron en “science” un artículo sobre la conversión de biomasa en Watts de energía eléctrica; para esto utilizaron material de excremento de ganado bovino sometido a presión y temperatura hasta la generación de combustión con la respectiva conversión mediante bobinas de cobre. Desde entonces innumerables grupos de trabajo han realizado investigaciones similares, entre los cuales destacan:

Vals y Vogel (2001), desarrollaron un sistema hibrido dual de energía eólica y biomasa de desechos orgánicos; la mayoría provenía de la energía eólica sin embargo la combustión de biomasa mantenían un voltaje constante aun en ausencia de vientos, esto hizo que en el 2002 el mismo equipo de trabajo construyeran el primer generador eléctrico con biomasa usando como principal materia prima residuos de alimentos y excrementos de animales de granja.

En Australia Smith y Worked (2003), diseñaron un sistema para aprovechar los gases producidos en el relleno sanitario en Syneid con la finalidad de utilizarlos como fuente energética alternativa, este sistema en efecto producía electricidad, pero era muy inestable, hasta la fecha aún se hacen estudios para mejorar este sistema

2. Mención de los puntos de vista de otros investigadores

Según (Campero, 2009, p. 3). Biodigestor se denomina al dispositivo en el que se llevan a cabo los procesos de transformación de la materia orgánica para la obtención de biogás, constituyéndose en el componente principal y más importante del sistema. Un biodigestor de desechos orgánicos o biodigestor es, en su forma más simple, un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos animales y humanos, desechos vegetales-no se incluyen cítricos ya que acidifican, etc.) en determinada dilución de agua para que se descomponga, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio.

Que los biodigestores son una valiosa alternativa para el tratamiento de los desechos orgánicos de las explotaciones agropecuarias ya que permiten: disminuir la carga contaminante, mejorar la capacidad fertilizante del material, eliminar los malos olores y, generar un gas combustible denominado biogás el cual puede fácilmente reemplazar al gas natural. (<http://imd.uncuyo.edu.ar/manual-de-uso-de-biodigestores>).

Según, (CEDECAP, 2007, p. 3) y (Aparcana 2008, p. 32). Los residuos de la fermentación (efluentes), contienen una alta concentración de nutrientes y materia orgánica, lo cual los hace susceptibles a ser utilizados como un excelente fertilizante que puede ser aplicado en fresco, ya que el proceso de digestión anaerobia elimina los malos olores y la proliferación de moscas. Otra ventaja es la eliminación de agentes patógenos presentes en las heces, lo cual significa que el efluente líquido puede ser utilizado para riego para cualquier tipo de cultivos.

(BIOMASA, 2011, p. 16-17) en su investigación comenta que las condiciones para la obtención de metano en el digestor son las siguientes: pH, que debe mantenerse cercano a la neutralidad, alcalinidad, es recomendable una alcalinidad superior a 1,5 g/l CaCO_3 , Potencial redox, con valores recomendables inferiores a -350 mV, Nutrientes, con valores que aseguren el crecimiento de los microorganismos, tóxicos e inhibidores, cuya concentración ha de ser la mínima posible, temperatura Podrá operarse en los rangos psicrófilico, mesófilico o termófilico. Las tasas de crecimiento y reacción aumentan

conforme lo hace el rango de temperatura, pero también la sensibilidad a algunos inhibidores, como el amoníaco, Agitación, Tiempo de retención es el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor, sometido a la acción de los microorganismos y velocidad de carga orgánica, es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo.

(Fernández, 2010, p. 9) en su trabajo realizado indica que el proceso de digestión anaerobia presenta cuatro fases diferenciadas: Hidrolisis: En esta parte las partículas y moléculas de la materia prima, como los carbohidratos, proteínas y lípidos, son disminuidas a compuestos orgánicos más simples, como aminoácidos, azúcares simples y ácidos grasos de cadena larga, Acidogénesis: Obtienen ácidos orgánicos, como acetato, propionato, butirato, etc., alcoholes y otros subproductos necesarios, como amoníaco, hidrógeno molecular, dióxido de carbono, etc.). Esta etapa la pueden llevar a cabo bacterias anaeróbicas o facultativas, Acetogénesis: En esta etapa se generan los precursores del biogás: ácido acético, hidrógeno molecular y dióxido de carbono y Metanogénesis: Aproximadamente un 70% de ésta ocurre a partir de acetato, mientras que un 30% restante se realiza vía H_2 y CO_2 .

Según (Varnero 2011 p. 22), en su investigación los microorganismos que participan en la digestión anaerobia son:(Paracoccus denitrificans, Pseudomonas stutzerii), (Desulfuromonas acetoxidans, Pyrodictium occultum), (Desulfovibrio desulfuricans, Desulfonema limicola), (Acetobacterium woodi, Clostridium aceticum, Methanobacterium thermoautotrophicum), (Escherichia coli, Wolinella succinogenes), (Alteromonas putrefaciens).

(Hilbert, 2007, p. 6). Menciona que los factores más importantes a tenerse en cuenta se desarrollarán los siguientes: el tipo de sustrato; la temperatura; la carga volumétrica; el tiempo de retención hidráulico; el nivel de acidez (pH); la relación Carbono/Nitrógeno; la concentración del sustrato; el agregado de inoculantes; el grado de mezclado; y la presencia de compuestos e inhibidores del proceso.

Según (Elías et al., 2012, p. 622). Indica en su investigación que la temperatura es uno de los parámetros más importantes en la digestión anaerobia, ya que determina la velocidad de degradación del proceso anaeróbico, principalmente la de las etapas de hidrólisis y metanogénesis. Existen tres rangos de temperatura en los que la digestión anaerobia puede llevarse a cabo: Psicrófilo: por debajo de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, Mesófilo: entre 30 y $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, Termófilo: entre 50 y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Con el aumento en el rango de temperaturas se aumenta la tasa de hidrólisis,

la velocidad de crecimiento y con ello la velocidad en la producción de biogás. También que los nutrientes son necesarios para satisfacer los requerimientos de crecimiento de los microorganismos. Los principales nutrientes necesarios para el crecimiento de estos son el carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P), así como trazas de algunos elementos minerales (S, K, Ca, Na, Mg, Fe), necesarios para la activación de enzimas para la metalogénesis. La relación C/N debe estar comprendida entre 15/1 y 45/1, con un valor recomendable de 30/1, mientras que para el fósforo la relación óptima C/P es 150/1.

Según. (Olaya y Gonzales 2009, p. 11). Concluye que el tiempo de retención es definido como el periodo de tiempo que permanece la materia orgánica dentro del sistema para alcanzar la degradación. El tiempo de retención está directamente relacionado con la temperatura ambiente y en condiciones óptimas del proceso, con una temperatura de 30 °C, el tiempo de retención (Tr) debería ser de 20 días; sin embargo, algunos autores han sugerido para cada ambiente los respectivos tiempos de retención, que comúnmente se presentan en biodigestores.

(Cuesta M. et al., 2009, p. 25), señala que es necesario mantener un grado de agitación en el medio de digestión tanto para mezclar y homogenizar el sustrato, distribuir el calor de manera uniforme (homogenizando la temperatura), favorecer la transferencia de gases, evitar la formación de espumas o sedimentación,

(Currie 1991, Corroborado por Téllez, 2008, p. 11). Indica que, si hay exceso de nitrógeno, se produce amoníaco en grandes cantidades el cual es un inhibidor, si por el contrario existe poco nitrógeno las bacterias no se multiplican y por lo tanto se limitará la producción de biogás.

Además, en su trabajo de investigación (Colque et al., 2005, p. 2). Resalta que el biol es una fuente de fitorreguladores que se obtiene como producto del proceso de descomposición anaeróbica de los desechos orgánicos en biodigestores, actúa como bioestimulante orgánico en pequeñas cantidades y es capaz de promover el crecimiento y desarrollo de las plantas.

(Vargas, 2014, p. 11). En su trabajo señala que el efluente de salida aproximadamente 90% corresponde al biol y el 10% al bioabono, estos porcentajes varían según los residuos a fermentar y del método de separación empleado. Siendo un fertilizante sólido parecido al compost. El Bioabono permite que los cultivos sean fortalecidos y ocurra un mejor rendimiento, mejorando la estructura del suelo y la capacidad de retención de la humedad

del mismo favoreciendo la actividad biológica, el bioabono inhibe el crecimiento de hongos y bacterias que afecten a las plantas.

Según (Botero y Thomas 1987. Corroborado por Soria et al., 2001, p. 356), menciona en su estudio realizado que la composición del bioabono en promedio tiene 8,5% de materia orgánica, 2,6% de nitrógeno, 1,5% de fósforo, 1,0% de potasio y un pH de 7,5. Que, al comparar estos valores con los resultados demostrados anteriormente, se verificó que efectivamente en el bioabono las diferencias de concentraciones de NPK son determinantes. Siendo el N en más concentración.

Según (García, 2011, p. 35), en su estudio realizado las ventajas que presenta el bioabono son: Fortalecer los cultivos mejorando los rendimientos, Permite el uso intensivo del suelo mejorando la estructura y la calidad del mismo, Confiere a los suelos arenosos una mayor cohesión mejorando con ello la retención de los nutrientes del suelo, favorece la actividad biológica en el mismo, Mejora la porosidad y por consiguiente la permeabilidad y ventilación, Puede ser combinado con la materia que va a ser compostada con el fin de acelerar el proceso de compostaje, Reduce la necesidad de abono, Inhibe el crecimiento de hongos y bacterias que afectan las plantas, Reduce la erosión del suelo, Cuenta con mayor disponibilidad de nutrientes (N, K, P, Fe y S).

En este trabajo se describe el diseño, la construcción y puesta en marcha de un biodigestor novedoso para tratar la fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Orgánicos (FORSU). Para ello, previamente se ha realizado una extensa revisión de la literatura existente en el ámbito de la digestión anaerobia de los residuos sólidos orgánicos. El biodigestor Natural S4 Loop, desarrollado y construido en Bolivia, es un reactor de bajo costo que trabaja en flujo pistón y que cuenta con un sistema de recirculación. La alimentación diaria del reactor se realiza con 100 kg de residuos del mercado de Tiquipaya (Cochabamba, Bolivia). Los resultados muestran un tiempo de retención hidráulico (TRH) y una velocidad de carga orgánica (VCO) teóricos de 75 días y 1,7 kg SV/m³ •día respectivamente. Este último valor es relativamente bajo en comparación con lo reportado en la literatura, mientras que el TRH es mayor a lo recomendado por otros autores para sistemas que tratan este tipo residuos. El costo total de la construcción del biodigestor asciende a 3.217,4 Euros. Díaz (2013).

En el trabajo “Diseño y Evaluación de un Sistema para la purificación del metano producido mediante Biodigestión. El diseño comprendía en pasar el biogás a través de una desulfuración biológica, que consiste en “un tanque que permite la aireación de una fase

liquida correspondiente a un cultivo de las bacterias aeróbicas A. Thiooxidans y S. Novella, capaces de oxidar el sulfuro” García (2010). Con este proceso consiguieron remover 56% del H₂S del biogás. En cuanto a la remoción del CO₂ a través de una columna cuyo proceso se diseñó a base de NaOH como absorbente de CO₂ no tuvo buenos resultados por dificultades que presentó el proceso, la principal dificultad fue a consecuencia de la baja presión del biogás que se genera en el biodigestor haciendo complicado la contracorriente con NaOH para la remoción de CO₂. En este trabajo recomiendan realizar un burbujeo en reemplazo de la columna a contracorriente, siendo este un proceso más simple.

Morero (2014) en su trabajo destaca la composición de biogás que fue analizado, los métodos de purificación disponibles diferenciados según tecnología y tipo de contaminante. Así también en su trabajo describe el equilibrio gas líquido en los procesos de purificación bajo un análisis termodinámico, considerando sistemas de no electrolitos (solventes físicos) y los sistemas con electrolitos (solventes químicos). En su capítulo quinto describe la realización de los procesos de purificación con agua Dimetil eter de polietilenglycol (DEPG) y Diglicolamina (DGA). Por último, realiza una comparación de los procesos de purificación y el impacto ambiental que puede tener al incorporarlos en un proceso industrial.

Según Varnero et al., (2012), en base al estudio realizado afirman “que existe gran interés por desarrollar alternativas para la eliminación de sulfuro de hidrógeno de la composición del biogás, para que éste pueda ser utilizado adecuadamente y sin restricciones en la matriz energética” puesto que el método biológico se destaca por no producir un tipo de contaminante remanente denominado “gas de cola” o “tail gas”. Otra de las consideraciones que establecen es que “la presión es directamente proporcional al consumo eléctrico del compresor” Varnero et al., (2012); que se traduce en una mayor eficiencia energética.

En su trabajo, Roslan et al., (2018), mencionaron que “es difícil producir gas altamente purificado de calidad suficiente en condiciones operativas típicas sin imponer presión externa”. Los resultados que obtuvieron del experimento, fueron para un biogás de 60% de metano después de la purificación alcanzaron un 90% de metano en el biogás, sin que se detecte sulfuro de hidrógeno; este nivel de calidad es aceptable para su uso como gas natural de consumo doméstico e industrial. También descubrieron, “que la relación de flujo de biogás con respecto al agua de lavado es el más crucial entre los diversos parámetros operativos que rigen el rendimiento de la purificación”.

En base a los resultados obtenidos en el trabajo “Comparison of Water Scrubbing and Propylene Carbonate Absorption for Biogas Upgrading Process” [Comparación de lavado con agua y carbonato de propileno Absorción para el proceso de mejora del biogás], En este trabajo, la viabilidad de la mejora del biogás con carbonato de propileno como absorbente se estudió mediante las pruebas comparativas de lavado con agua y absorción de carbonato de propileno. Los factores de influencia fueron la relación gas / líquido de absorción, la relación gas / líquido de extracción de aire y el contenido de sulfuro de hidrógeno en el gas de alimentación. La capacidad del biogás tratado con carbonato de propileno fue de 4 a 5 veces mayor que la del agua. La absorción de carbonato de propileno mostró mejor tolerancia a la existencia de sulfuro de hidrógeno Nie et al., (2013).

3. Corriente o enfoque elegido por los investigadores

Según (Barrantes 2002) que paradigma naturalista es denominado también naturalista – humanista o interpretativo y, según los pensadores que lo han analizado a fondo, su interés se centra en el estudio de los significados de las acciones humanas y de la vida social, además menciona que paradigma positivista conduce al enfoque cuantitativo y paradigma naturalista al enfoque cualitativo, asimismo la investigación cualitativa postula una concepción fenomenológica, inductiva, orientada al proceso. Busca descubrir o generar teorías. Pone énfasis en la profundidad y sus análisis no necesariamente son traducidos a términos matemáticos.

El enfoque cualitativo se apoya en la recolección y resumen de **datos cualitativos** por medio de **métodos verbales** o **narrativos**, como entrevistas profundas, análisis de documentos y la observación participativa. Sus objetivos más frecuentes son describir y explorar la conducta humana en contextos específicos, con la finalidad de descubrir patrones, temas y facetas comunes en todas las sociedades. (Pimienta, 2012, p. 67).

Como el trabajo de investigación se trata de diseñar un Biodigestor para la producción de Bioabonos, Gas metano (CH₄) y Aprovechamiento en la generación de Electricidad, y analizando las características del presente trabajo de investigación y en concordancia con las fuentes mencionadas anteriormente, se determinó elaborar el proyecto de investigación multidisciplinario mediante el **enfoque cualitativo**, con recolección de información primaria y secundaria, inclusive haciendo visitas a los centros donde se implementaron los biodigestores y con la observación de los mismos se diseñará el proyecto para nuestro contexto para demostrar que los desechos orgánicos urbanos o (Residuos Sólidos Urbanos

- RSU) puedan ser procesados y aprovechados en productos terminados que de alguna manera genere beneficios a las familias necesitadas.

4. Identificación de fuentes

Almeida, A., Nafarrate, E., Alvarado, A., Cervantes, A., Luevanos,. Oropeza, R. & Balagurusamy, N. (2011). Expresión genética en la digestión anaerobia: un paso adelante en la comprensión de las interacciones tróficas de esta biotecnología. Universidad Autónoma de Coahuila. 81p. Realiza una revisión sobre los aspectos degradativos de la materia orgánica, obtención de energía y nutrientes de las bacterias anaeróbicas.

Aparcana, S. (2005). Aprovechamiento energético de los residuos de un matadero frigorífico industrial y la biomasa regional en Arequipa, Perú bajo la aplicación de la gestión de flujos de materiales y energía. Universität Trier . Alemania. 128p. Nos indica que el uso del biol es principalmente como promotor y fortalecedor del crecimiento de las plantas, raíces y frutos gracias a la producción de hormonas vegetales, las cuales son desechos del metabolismo de las bacterias típicas de este tipo de fermentación que no se presenta en el compost.

Aparcana, R. (2008). Estudio sobre valor fertilizante de los productos del “Proceso anaeróbico” para producción de biogás. 101p. En su estudio nos dice que la calidad del biol y biosol dependen de las materias primas que son fermentadas y de las condiciones de la fermentación. Según sea el tipo de residuo, este tendrá diferente capacidad de degradarse.

Arrieta, W. 2016. Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado. Universidad de Piura. Piura, Perú. p. 231. La tesis tiene como finalidad el diseño de una instalación de biogás domestica que permita aprovechar las excretas de ganado vacuno o porcino, satisfaciendo así la demanda energética para la iluminación y cocción diaria de alimentos de una familia de cinco a seis miembros.

Barrantes, R. (2002). Investigación: Un camino al conocimiento, un enfoque cualitativo y cuantitativo. Ed. Universidad Estatal a Distancia, San José. Costa Rica. p. 243. Se enmarca en el paradigma científico naturalista – humanista.

Biomasa. (2011). Digestores anaerobios. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía. p. 42. Indica que el tratamiento del purín aplicado digestión anaeróbica en cabecera produce la eliminación de los malos olores desagradables, recupera la energía

renovable del purín en forma de biogás, permite la fabricación de un fertilizante orgánico y mineral homogéneo de buena calidad.

Bote, P. (2013). Estudio de los efectos del pH extremo por adición de NaOH sobre la producción y calidad del biogás y otros parámetros de la digestión anaerobia urbana. Instituto Universitario del agua y de las Ciencias Ambientales. España. 91p.

Cabos, J., Bardales, C., León, C. & Gil, L. (2019). Evaluación de las concentraciones de nitrógeno, fosforo y potasio del biol y biosol obtenidos a partir de estiércol de ganado vacuno en un biodigestor de geomembrana de policloruro de vinilo. Universidad Privada Antenor Orrego. Trujillo, Perú. 1176 p.

Campero, O. (2009). Biogás en Bolivia programa “viviendas auto energéticas”. Tecnologías en desarrollo. Bolivia. 8p. El proyecto ha generado la instalación de biodigestores de bajo costo de tecnología intermedia, de manera pionera en Bolivia y en condiciones de valle, altiplano y trópico.

CEDECAP. (2007). Biodigestor de Polietileno: Construcción y Diseño. Argentina. p. 15. Este proyecto tuvo como finalidad de difundir y hacer conocer esta tecnología para el uso de energía, tanto a nivel de diseño y adaptación de estos sistemas a las diferentes ecorregiones.

Colque, T., Mujica, A. y Apaza, V. (2005). Producción de Biol y abono líquido Natural y Ecológico. Puno, Illpa, Perú. p. 14. Pretende orientar a los pequeños medianos y empresas agricultoras, familias de las comunidades campesinas organizadas; adquirir conocimientos, técnicos y experiencias.

Díaz, A. (2013). Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya. (Bolivia). Barcelona TECH. p. 89. El presente trabajo llevo a cabo el diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor novedoso, de nombre Natural S4 Loop, para tratar 100 kg/día de residuo biodegradable proveniente del mercado de verduras y frutas de Tiquipaya (Cochabamba, Bolivia).

Elías, X., Campos, E., y Flotats, X. (2012). Procesos biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje. Madrid, España. p. 684.

Fernández, J. (2010). Optimización de la digestión anaeróbica seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura. Universidad de Cádiz. España. 86p.

García, V. (2011) MANUAL DE BIOGÁS. Buenos Aires. p. 46.

Hilbert, J. (2007). Manual para la producción de biogás. Instituto de Ingeniería rural. México DF. p. 54.

León, C., Norberto, C., y Mendoza, G. 2019. Diseño e implementación de una planta piloto de producción de Biogás, Biol y Biosol. Se logró diseñar e implementar una planta para la producción de biogás, biol y biosol. El presente proyecto logro diseñar una planta para la producción de biogas, biol y biosol, también evaluó el proceso de producción y cuantificación de biogás, biol y biosol, a partir de estiércol de ganado vacuno.

Narváez, Y. Saltos, A. (2007). Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor tipo piloto para la obtención de biogás y bioabono a partir de la mezcla de estiércol vacuno y suero de queso. Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador. p. 144. El objetivo de este trabajo de investigación es construir un equipo para producir biogás para uso doméstico y bioabono como mejorador del suelo, aprovechando el estiércol vacuno y suero de queso como fuente generadora de biogás y bioabono a partir de la fermentación anaeróbica.

Núñez, O. 2015. Diseño y construcción de un Biodigestor para la generación de biogás y fertilizante orgánico. Universidad de Guantánamo. Guantánamo, Cuba. p. 42. En el presente trabajo se muestran los resultados del diseño y construcción de una planta de biogás de cúpula fija para el tratamiento de los residuales porcinos a través de la digestión anaeróbica. Se describe la metodología para el cálculo de las dimensiones del digestor de biogás, el cual permite procesar 200 kg/día de excretas, con lo cual se obtienen 6,1m³/día de biogás y 3,4 t/año de abono orgánico

Olaya, Y. y Gonzales, L. (2009). Fundamentos para el diseño de biodigestores. Universidad Nacional de Colombia. Palmira: UNAL Editorial. p. 31. El diseño se ha orientado hacia el aprovechamiento de residuos orgánicos provenientes de un alojamiento pecuario para cerdos (porqueriza).

Pimienta, P. J. (2012). Metodologías de la Investigación. Instituto Superior Pedagógico de La Habana, Cuba Universidad Anáhuac, México. p. 167. Metodología de la investigación

motiva a los jóvenes a vincular los conceptos teóricos de la investigación científica con el reconocimiento de los problemas que les rodean.

Vargas, F. (2014). Plantas Medicinales, una alternativa para la agricultura familiar. Asunción, Paraguay. 23p.

Varnero, M. (2011). Manual de biogás. Ministerio de Energía. Santiago, Chile. p. 119. Indica que el biogás, como fuente de energía renovable, ha despertado un gran interés en los últimos años, siendo tal vez una de las tecnologías de más fácil implementación, sobre todo en sectores rurales. Su potencial desarrollo, no solo considerando la producción de biogás, sino que como ayuda a la obtención de biofertilizante y tratamiento de problemas sanitarios en algunos casos, hacen que replicabilidad y difusión en los sectores con abundancia de materia orgánica de desecho sea atractivo.

Zea, J., Bernal, J. y Carvajal, D. 2015. biodigestores de escala a 50 litros, una solución para la producción de gas, abono y aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos. Corporación Universitaria minuto de Dios. Soacha. p. 25. El presente proyecto tiene como propósito diseñar un biodigestor para generar biogás y abono orgánico a partir de desechos orgánicos, aplicable en las zonas agrarias del municipio y en las empresas del sector productivo que implementen esta alternativa dentro de su sistema de producción.

CAPÍTULO III: MARCO CONCEPTUAL

1. Biodigestor

Biodigestor se denomina al dispositivo en el que se llevan a cabo los procesos de transformación de la materia orgánica para la obtención de biogás, constituyéndose en el componente principal y más importante del sistema. Un biodigestor de desechos orgánicos o biodigestor es, en su forma más simple, un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos animales y humanos, desechos vegetales-no se incluyen cítricos ya que acidifican-, etc.) en determinada dilución de agua para que se descomponga, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio. (Campero, 2009, p. 3).

1.1. Partes de un biodigestor

(CEDECAP, 2007, p. 3) y Aparcana, 2008, p. 32). Los residuos de la fermentación (efluentes), contienen una alta concentración de nutrientes y materia orgánica, lo cual los hace susceptibles a ser utilizados como un excelente fertilizante que puede ser aplicado en fresco, ya que el proceso de digestión anaerobia elimina los malos olores y la proliferación de moscas. Otra ventaja es la eliminación de agentes patógenos presentes en las heces, lo cual significa que el efluente líquido puede ser utilizado para riego para cualquier tipo de cultivos.

1.2. Condiciones para la biodigestión

(BIOMASA, 2011, p. 16-17.) Las condiciones para la obtención de metano en el digestor son las siguientes:

- **pH**, debe mantenerse cercano a la neutralidad.
- **Alcalinidad**, para asegurar la capacidad tampón y evitar la acidificación. Es recomendable una alcalinidad superior a 1,5 g/l CaCO_3 .
- **Potencial redox**, con valores recomendables inferiores a -350 mV.
- **Nutrientes**, con valores que aseguren el crecimiento de los microorganismos.
- **Tóxicos e inhibidores**, cuya concentración ha de ser la mínima posible. Los parámetros operacionales hacen referencia a las condiciones de trabajo de los reactores:

- **Temperatura.** Podrá operarse en los rangos psicrófilico (temperatura ambiente), mesófilico (temperaturas en torno a los 35 °C) o termófilico (temperaturas en torno a los 55 °C). Las tasas de crecimiento y reacción aumentan conforme lo hace el rango de temperatura, pero también la sensibilidad a algunos inhibidores, como el amoníaco. En el rango termófilico se aseguran tasas superiores de destrucción de patógenos.
- **Agitación.** En función de la tipología de reactor debe transferirse al sistema el nivel de energía necesario para favorecer la transferencia de sustrato a cada población o agregados de bacterias, así como homogeneizar para mantener concentraciones medias bajas de inhibidores.
- **Tiempo de retención.** Es el cociente entre el volumen y el caudal de tratamiento, es decir, el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor, sometido a la acción de los microorganismos.
- **Velocidad de carga orgánica,** OLR en inglés. Es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo. Valores bajos implican baja concentración en el influente y/o elevado tiempo de retención. El incremento en la OLR implica una reducción en la producción de gas por unidad de materia orgánica introducida.

2. Digestión anaeróbica

Según (García, 2009, p. 2). La digestión anaeróbica consiste en la oxidación biológica de la materia orgánica mediante microorganismos específicos en ausencia de oxígeno molecular. Como consecuencia de este proceso, la materia orgánica se transforma por un lado en productos estables e inertes como el biol, y por el otro, en biogás (principalmente metano y dióxido de carbono), ambos productos con un valor energético considerable. La degradación anaeróbica es un proceso complejo en el que intervienen diferentes grupos microbianos, de manera coordinada y secuencial, para transformar la materia orgánica presente en los lodos hasta los productos finales del proceso

2.1. Procesos de biodigestión anaeróbica

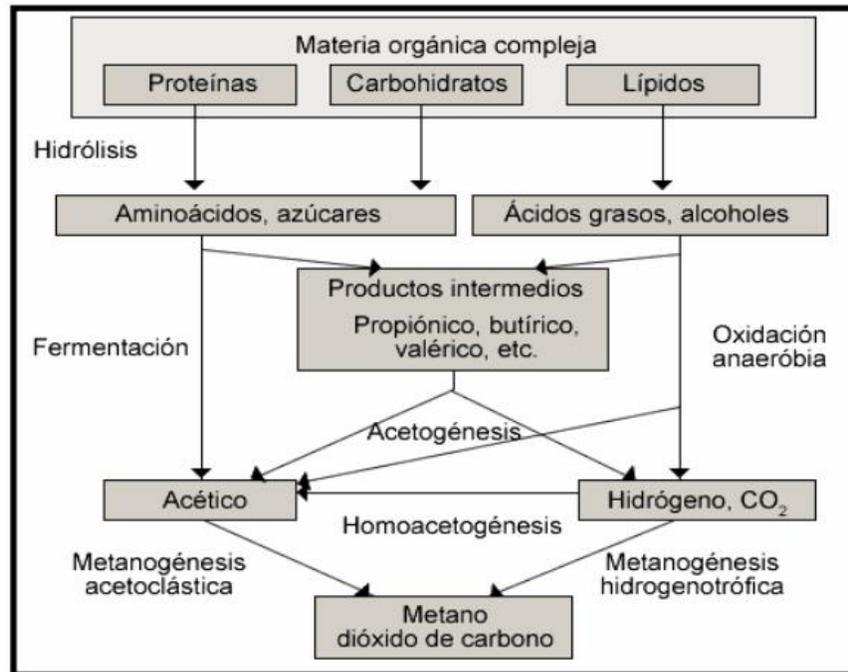
La digestión anaerobia está caracterizada por la existencia de tres fases diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato. Interviniendo diversas poblaciones de bacterias. Se identifican cinco grandes poblaciones bacterianas, las cuales actúan catalizando tres

procesos consecutivos: hidrólisis, acidogénesis (formación de ácidos), y metanogénesis (formación de metano); constituyendo cuatro etapas. (Elías, *et al.* 2012, p. 618).

2.1.1. Hidrólisis

Consiste en la solubilización de los sólidos. En esta parte las partículas y moléculas complejas de la materia prima, como los carbohidratos, proteínas y lípidos, son disminuidas a compuestos orgánicos más simples, como aminoácidos, azúcares simples y ácidos grasos de cadena larga (Christensen, 2011, p. 8). Además, se generan péptidos, pequeñas cantidades de ácido acético, hidrógeno molecular y dióxido de carbono. (Cheng, 2007, p. 8).

Figura 1. Esquema de Producción de Biogás.



Fuente: (García, 2009, p. 2).

2.1.2. Acidogénesis

Los compuestos orgánicos sencillos generados en la etapa anterior son utilizados por las bacterias generadores de ácidos. Como resultados se produce su conversión en ácidos orgánicos volátiles (acetatos, propionato, butirato, etc.) alcoholes y sus otros subproductos

importantes para etapas posteriores (amoníaco, hidrogeno y dióxido de carbono). Esta etapa la pueden llevar a cabo bacterias anaeróbicas o facultativas. (García, 2009, p.3).

El valor optimo del pH para que se desarrolle la etapa de acidogenesis está alrededor de 5,5 – 6,7. según algunos autores el pH en esta fase puede estar en el orden de 6 - 7,5. dependerá siempre del tiempo de retención y del tipo de sustrato. En esta etapa se empiezan a formar los gases como, H₂S, CO₂ y amoníaco NH₃. (<https://www.aqualimpia.com/digestion-anaerobica/>)

2.1.3. Acetogénesis

Esta es una fase en la cual se aceleran los procesos metabólicos bacterianos, con transformación enzimática o hidrólisis, de lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos, en otros compuestos que serán utilizados como fuentes de energía y como transformación a carbono celular (Martí, 2006, p.66).

El mecanismo de transformación puede ser por deshidrogenación acetogénica, que genera acetato desde ácidos grasos y alcoholes o por hidrogenación acetogénica, donde los microorganismos sintetizan acetato a partir de H₂ y CO₂ (Fernández, 2010, p. 45).

En caso de elevarse la concentración de hidrógeno, por motivos energéticos se inhibe la acetogénesis, acumulando productos de los procesos anteriores y frenando la producción de metano (Deutsche, 2012, p. 21).

2.1.4. Metanogénesis

La ruta metabólica de los microorganismos depende de la naturaleza del sustrato, pero aproximadamente un 70% de ésta ocurre a partir de acetato, mientras que un 30% restante se realiza vía H₂ y CO₂. En caso de ocurrir acumulación de H₂, los microorganismos prefieren esta ruta metabólica. (Fernández, 2010, p. 10).

Cuadro 1. Parámetros presentes en las etapas principales de degradación

Parámetro	Hidrolisis/Acidogénesis	Formación de metano
Temperatura	25-35 °C	Mesofílico (32 - 42 °C)
Valor de Ph	5,2-6,3	Termofílico (50 - 558 °C)
Razón C/N	(10-45)	(6,7- 7,5)
Contenido de MS	<40% Ms	(20-30)
Potencial redox	(+400 a -300 mV)	<30%MS
Razón C:N:P:S requerida	500:15:5:3	600:15:5:3
Trazas de elementos	N/a	Ni,Co,Mo,Se

Fuente: (Pérez, 2010, p. 28).

Cuadro 2. Condiciones óptimas para el crecimiento de metanógenos

Condición	(Nursen& Coautores, 2004)	(Wang&Coautores,2011)
pH	6.6 a 7.6	6.8 a 7.5
Temperatura(°C)	32 a 42	25 a 30
Potencial Redox(mV)	-	<- 350

Fuente: (Nursen & Coautores, 2004) (Wang & Coautores, 2011) p. 26

3. Microorganismos que influyen en la digestión anaeróbica

Cuadro 3. Bacterias que participan durante las cuatro fases de la digestión anaeróbica

Taxonomía	Especies	Descripción	Metabolismo
Genero Acetobacterium	A. Woodi A. Paludosum	El género Acetobacter comprenden un grupo de bacilos Gram negativos, móviles que realizan una oxidación incompleta de alcoholes, produciendo una acumulación de ácidos orgánicos como productos finales.	Reducen autotróficamente compuestos poliméricos, oligómeros, monómeros y CO ₂ , utilizando el hidrogeno como fuente de electrones. Estos microorganismos hacen posible la descomposición de los ácidos grasos y compuestos aromáticos.
Genero eubacterium	E. rectale E. siraeum E. plautii E. cylindroides E. brachy E. desmolans E. callandrei E. limosum	El género Eubacterium consiste en un grupo de bacterias anaeróbicas obligadas Gram – Positivas	La mayoría de las eubacterias son capaces de descomponer sustratos complejos a través de mecanismos especiales. Algunas especies se desarrollan autotróficamente por lo tanto son capaces de cumplir funciones específicas en la descomposición anaeróbica

Fuente: (Insam, et al, 2009, p. 23).

3.1. Bacterias que participan en la hidrólisis

Los microorganismos de muchos géneros son los responsables en la hidrólisis. Entre estos destacan: Bacteroides, Lactobacillus, Propioni- bacterium, Sphingomonas, Sporobacterium, Megasphaera, Bifidobacterium (Varnero, 2011, p. 24).

Cuadro 4. Principales géneros de bacterias que han sido aislados de ambientes metanógenos

Hidrolíticas	Fermentadoras	Sulfatorreductoras
Clostridium Acetovidrio Micrococcus Staphylococcus Bacillus	Pseudomonas Lactobacillus Zymomonas Escherichia Sarcina Selenomonas	Desulfomonas Desulfovidrio Desulfobacter Desulfococcus Desulfosarcina
Acetogénicas Sintroficas	Metanogénicas Acetoclasticas	Metanogénicas Hidrogenofilicas
Syntrophomonas Syntrophobacter	Methanotrix Methanosarcina Methanospirillum	Methanobacterium Methanobrevibacterium Methanoplanus

Fuente: (Hernández, 2005, p. 16).

3.2. Bacterias que participan de la acidogénesis

La mayoría de los microorganismos acidogénicos también participan de la hidrólisis. El género Clostridium, Paenibacillus y Ruminococcus están presentes en todas las fases del proceso de fermentación, pero son dominantes en la fase acidogénica. El grupo Cytophaga-Flavobacterium-Bacteroides representa el segundo grupo más grande demicroorganismos durante las dos primeras fases de la descomposición. Sin embargo, en la fasemetanogénica representan menos del 5% del total de microorganismos. Esto indica que estos grupos son los principales responsables de la degradación de compuestos monoméricos. (Varnero, 2011, p. 24).

3.3. Bacterias que participan de la acetogénesis

Las bacterias homoacetogénicas son microorganismos anaerobios estrictos los cuales catalizan la formación de acetato a partir de hidrogeno (H) y dióxido de carbono (CO₂). La reducción del dióxido de carbono en todos los homoacetógenos se produce por la ruta de la acetil-CoA, esta ruta también es útil para la fijación de carbono por las bacterias sulfatoreductoras y la fermentación de homoacetógenos para producir acetato como producto final (Almeida *et al.* 2011, p.66).

3.4. Bacterias que participan de la metanogénesis

Las metanogénicas activas aparecen en la segunda fase de la fermentación, la fase de acidogénica. Sin embargo, obviamente el número de Arqueas metanogénicas aumenta en la fase metanogénica. Las principales especies están representadas por *Methanobacterium*, *Methanospirillum hungatii*, y *Methanosarcina*. (Varnero, 2011, p. 24).

3.5. Especies metanotróficas

Las especies metanotróficas (especies que consumen metano) se encuentran presentes en todas partes, pero no son deseables en una planta de producción de biogás. La mayoría de estos son aeróbicos. Estos microorganismos utilizan el oxígeno para degradar el metano y obtener su energía. Los productos metabólicos son el agua y el dióxido de carbono. Los metanotróficos aeróbicos degradan aproximadamente el 17% de todo el metano en la atmósfera. Además de estos, existe otro grupo de metanotróficos, que es capaz de consumir metano, sin necesidad de oxígeno. Estos se encuentran en su mayoría en los sedimentos marinos. Los microorganismos metanotróficos sintetizan sus lípidos a partir del metano. (Varnero, 2011, p. 24).

4. Factores que influyen en la biodigestión

Entre los factores más importantes a tenerse en cuenta se desarrollarán los siguientes: el tipo de sustrato (nutrientes disponibles); la temperatura del sustrato; la carga volumétrica; el tiempo de retención hidráulico; el nivel de acidez (pH); la relación Carbono/Nitrógeno; la concentración del sustrato; el agregado de inoculantes; el grado de mezclado; y la presencia de compuestos 7 inhibidores del proceso. (Hilbert, 2007, p. 6).

4.1. Tipo de materia prima

Las materias primas fermentables incluyen dentro de un amplio espectro a los excrementos animales y humanos, aguas residuales orgánicas de las industrias (producción de alcohol, procesado de frutas, verduras, lácteos, carnes, alimenticias en general), restos de cosechas y basuras de diferentes tipos, como los efluentes de determinadas industrias químicas. El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores). (Hilbert, 2007, p.7).

Cuadro 5. Rendimiento de materia prima empleada

Componente	Desechos Agrícolas	Lodos Cloacales	Desechos Industriales	Relleno Sanitario
Metano	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%
Dióxido de carbono	20-50%	20-50%	30-50%	34-55%
Agua	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Hidrogeno	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%
sulfuro de hidrogeno	100-700ppm	0-1%	0-8%	0,5-100ppm

Fuente: (Carrillo, 2003, p. 8)

Según (Narvaez y Saltos 2007, p.15-16). Las materias primas fermentables incluyen dentro de un amplio espectro a los excrementos animales y humanos, aguas residuales orgánicas de las industrias (producción de alcohol, procesado de frutas, verduras, lácteos, carnes, restos alimenticios en general), restos de cosechas y basuras de diferentes tipos, como los efluentes de determinadas industrias químicas. El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también deben estar en cierto equilibrio con sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores). Normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo, en la digestión de ciertos desechos industriales pueden presentarse el caso de ser necesaria la adición de los compuestos enumerados o bien un post tratamiento aeróbico.

Cuadro 6. Composición y rendimiento de biogás de diferentes materias primas

Materia Prima	Materia Seca (%)	Materia Orgánica (% de MS)	Rendimiento de Biogás (m ³ /Ton MOS)	Rendimiento Biogás (m ³ /Ton Húmeda)
Cultivos energéticos (c)	-	-	550 a 750	-
Desechos Agroindustriales (b)	-	-	400 a 800	-
Estiércol de vaca	7 a 15	65 a 85	200 a 400	9 a 51
Estiércol de puerco	3 a 13	65 a 85	350 a 550	7 a 61
Fracción orgánica de los RSM's	-	-	400 a 600	-
Gallinaza	10 a 20	70 a 80	350 a 550	24 a 88
Lodos de las aguas residuales	-	-	250 a 350	-
Residuos de cultivos	-	-	300 a 400	-
Residuos del procesamiento de la carne	-	-	550 a 1,110	-
Desechos vegetales (a)	10 a 20	65 a 85	400 a 700	25 a 120
Ensilaje de maíz (a)	15 a 40	75 a 95	500 a 900	55 a 340
Ensilaje de pasto (a)	8 a 50	70 a 90	600 a 1,300	30 a 585

(a) Puede variar de acuerdo al lugar, tratamiento, proceso y almacenaje

(b) Como aguas residuales de la industria láctea y de la molienda de los aceites, residuos de la cerveza y de destilerías

(c) Como maíz, sorgo, etc.

Fuente: Adaptada de (Deutsche, 2005) y (Massi, 2012, p. 20).

Como se puede observar, los residuos del procesamiento de la carne es el que tiene mayor contenido carga orgánica en cuanto a materia prima; y como aditivo del proceso de biodigestión es el ensilaje de pasto. Una de las ventajas de tratar el estiércol, ya sea adicionando sustrato o no, es que se reduce el tiempo de diezmado de las bacterias patógenas. (Merced, 2012, p. 20).

Se expone a continuación una tabla indicativa sobre cantidades de estiércol producido por distintos tipos de animales y el rendimiento en gas de los mismos tomando como referencia el kilogramo de sólidos volátiles. (Cheng, 1979, p.17).

Cuadro 7. Cantidad de estiércol producido por distintos tipos de animales

ESPECIE	PESO	kg ESTIERCOL/día	l/kg.S.V	%CH ₄
Cerdos	50	4,5-6	340-550	65-70
Vacunos	400	25-40	90-310	65
Ovinos	45	2,5	90-310	63
Aves	1.5	0,06	310-620	60
Caprinos	40	1,5	110-290	-

Fuente (Cheng, 1979, p.17).

4.2. pH

Según (Elías *et al.* 2012, p. 622), en cada fase del proceso los microorganismos presentan máxima actividad en un rango de pH diferenciado:

Cuadro 8. Rangos óptimos de pH para los diferentes microorganismos

Etapa	Tipo de bacterias	Rango optimo pH
Hidrolisis	Hidrolíticas acidogénicas	7,2 - 7,4
Acidogénesis	Hidrolíticas acidogénicas	7,2 - 7,4
Acetogénicas	Acetogénicas y homoacetogénicas	7,0 - 7,2
Metanogénicas	Metanogénicas hidrogenófilas y acetoclasticas	6,5 - 7,5

Fuente: Adaptado por (Elías *et al.* 2012, p. 622).

El mayor problema generalmente es mantener el pH por encima de 6,6, ya que los ácidos orgánicos producidos como intermediarios en las primeras etapas debido a una sobrecarga o cualquier otro desequilibrio pueden provocar un rápido descenso del pH y el consiguiente cese de la producción de metano (Rittmann y McCarty, 2001, p. 22).

Los valores de pH pueden ser corregida para mantenerlo dentro del rango adecuado para el proceso de fermentación, cuando el pH es alto se puede sacar frecuentemente una pequeña cantidad de efluente y agregar materia orgánica fresca en la misma cantidad o bien, Cuando el pH es bajo se puede agregar fertilizante, cenizas, agua amoniacal diluida. (Toruño *et al.* 2016, p. 17).

4.3. Temperatura

Según Elías *et al.* 2012, P. 622). La temperatura es uno de los parámetros más importantes en la digestión anaerobia, ya que determina la velocidad de degradación del proceso

anaeróbico, principalmente las de las etapas de hidrólisis y metanogénesis. Existen tres rangos de temperatura en los que la digestión anaerobia puede llevarse a cabo:

- Psicrófilo: por debajo de 25 °C
- Mesófilo: entre 30 y 40 °C
- Termófilo: entre 50 y 60 °C

Con el aumento en el rango de temperaturas se aumenta la tasa de hidrólisis, la velocidad de crecimiento y con ello la velocidad en la producción de biogás (Elías *et al.* 2012, p. 622).

Cuadro 9. Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica

Fermentación	Mínimo	Optimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psychrophilica	4-10°C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesophilica	15-20°C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Thermophilca	25-45°C	50-60°C	75°C- 80°C	10-15 días

Fuente: (Lagrange, 1979, Mencionado por Varnero, 2011, p. 39).

Una estrategia para aumentar la temperatura del biodigestor y, a la vez, mantenerla más constante consiste en la construcción de una estructura liviana forrada con plástico de invernadero, la cual también contribuye a restringir el acceso de animales que puedan dañarlo (Sarabia, 2018, p. 19).

4.4. Nutrientes

Como en el resto de sistemas de tratamiento biológicos, los nutrientes son necesarios para satisfacer los requerimientos de crecimiento de los microorganismos. Los principales nutrientes necesarios para el crecimiento de estos son el carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P), así como trazas de algunos elementos minerales (S, K, Ca, Na, Mg, Fe), necesarios para la activación de enzimas para la metanogénesis. La relación C/N debe estar comprendida entre 15/1 y 45/1, con un valor recomendable de 30/1, mientras que para el fósforo la relación óptima C/P es 150/1 (Elías *et al.* 2012, P. 622); mientras que para el sector rural el estiércol contiene el carbono necesario para la producción de biogás (Pérez, 2010, p. 11)

4.5. Potencial redox

Para adecuado crecimiento de los anaerobios obligados el valor del potencial redox se debe mantener entre -220 mV a -350 mV a pH 7.0 de manera de asegurar el ambiente fuertemente reductor que las bacterias metanogénicas necesitan para su óptima actividad. Cuando se cultivan metanogénicas, se incorporan agentes reductores fuertes tales como sulfuro, cisteína o titanio III para ajustar el medio a un potencial redox adecuado (Varnero, 2011, p. 46)

Según (Pérez, 2010, p. 36). En el bioreactor son necesarios potenciales redox bajos, por ejemplo, para un monocultivo de bacteria metano génica se necesita un potencial redox entre [-300, -330] mV como óptimo. Para controlar este parámetro se pueden agregar agentes oxidantes por ejemplo sulfatos, nitritos o nitratos.

Está relacionado con el pH y con el contenido de oxígeno. Es análogo al pH ya que el pH mide la actividad de protones y el potencial redox mide la de los electrones. (Ward 2008, mencionado por Pérez, 2010, p. 24)

4.6. Tiempo de retención hidráulico y velocidad de carga orgánica

Según (Campos, 2001, p. 295), este concepto se refiere al tiempo que el sustrato permanece en el biodigestor sometido a la acción de los microorganismos. Existe un tiempo de retención mínimo, el cual limitaría el desarrollo del proceso. En un sistema de mezcla completa, este tiempo de retención hidráulico deberá ser como mínimo el correspondiente a la velocidad de crecimiento de los organismos. Cuanto mayor sea el tiempo de retención, mayor será la producción de biogás por unidad de materia orgánica introducida. El tiempo de retención usado entre 25 y 45°C (rango mesófilo), para residuos ganaderos y lodos de depuradora, está entre los 15 y 20 días, sin embargo, el tiempo estará estrechamente relacionado con el tipo de biodigestor utilizado.

Bajos valores de volumen de carga orgánica (VCO) implican una baja concentración en el afluente y elevados tiempos de retención hidráulica; por otra parte, cuando existe un incremento en la VCO, implican reducción en la producción de biogás por unidad de materia orgánica introducida. Así existirá una velocidad de alimentación óptima para cada biodigestor según su tamaño, la cual producirá la máxima cantidad de biogás (Yadvika *et al.* 2004, p. 6).

Cuadro 10. Tiempo de retención según la temperatura

Regiones características	Temperatura (°C)	Tiempo de retención(días)
Trópico	30	25
Valle	20	37
Altiplano	10	75

Fuente: (Biodigestores familiares, p. 17).

4.7. Agitación

Según, (Elías *et al.* 2012, p. 623). Citan las siguientes razones para mantener un cierto grado de agitación en el medio en digestión:

- Mezclado y homogeneizado del sustrato de alimentación con el inóculo.
- Distribución uniforme de calor para mantener una isoterma suficientemente correcta
- Evitar la formación de espumas o la sedimentación.
- Favorecer la transferencia de gases, que pueden ser atrapados en forma de burbujas en el sustrato.

Es necesario mantener un grado de agitación en el medio de digestión tanto para mezclar y homogenizar el sustrato, distribuir el calor de manera uniforme (homogenizando la temperatura), favorecer la transferencia de gases, evitar la formación de espumas o sedimentación (Cuesta, M. *et al.* 2009, p. 25), también ayuda a distribuir de manera uniforme los microorganismos (Karim, K. *et al.* 2005, p.179) y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica. La agitación aumenta la producción de biogás y disminuye el tiempo de retención hidráulica (Varnero, 2011, p. 51).

Cada vez que se alimenta el biodigestor debe agitarse. La agitación produce que el sustrato cargado entre en íntimo contacto con las bacterias que se encuentran dentro del biodigestor. Por eso se recomienda agitar lentamente el mayor tiempo posible, luego de haber realizado la carga. Es recomendable agitar el digestor varias veces por día, y siempre que se lo alimente para mejorar el rendimiento y acelerar el proceso de degradación. Es posible utilizar diferentes mecanismos de agitación, desde la manera mecánica (batido manual) o el provocado por la entrada y salida de los líquidos, hasta otros más sofisticados en el cual se utilizan equipos que involucran agitadores a hélices, recirculadores de sustrato o manera neumática con burbujeo de biogás recirculado a una presión adecuada (Castillo, 2010, p. 12).

Según (Varnero, 2011, p. 51). Se distinguen 3 tipos de agitación, estas son:

- **Mecánica:** a través de agitadores manuales o con motores eléctricos.
- **Hidráulica:** a través de bombas de flujo lento con las que se hace recircular la biomasa.
- **Burbujeo de biogás:** se recircula el biogás producido hacia el fondo del biodigestor por medio de cañerías, para producir burbujeo y de esta manera movimiento de la biomasa

Según (academia de las renovables, 2019, p.13). La agitación mecánica, para sistemas de pequeña y mediana escala la agitación manual es la más económica y simple de colocar. Por regla general, se debe agitar de 2-5 minutos antes y después de cargar el digestor. Luego no se debe agitar nuevamente en todo el día. Esto es un dato empírico, pero está demostrado por la experiencia que aumentar la frecuencia de la agitación no conduce a mayor producción de biogás. De hecho, el movimiento de las paletas puede dañar las bacterias si se hace de manera muy fuerte.

4.8. Sustancias inhibidoras

El proceso de digestión anaerobia es inhibido por la presencia de tóxicos en el sistema. El nitrógeno amoniacal, el ácido sulfhídrico y los ácidos grasos volátiles son inhibidores importantes de las bacterias metanogénicas, así como los metales pesados a altas concentraciones. Este tipo de sustancias pueden encontrarse como componentes del sustrato de alimentación o como subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos del reactor. (Bote, 2013, p. 10).

Concentraciones elevadas de amoniaco y nitrógeno, sales minerales como los iones metálicos y algunas sustancias orgánicas como detergentes, desinfectantes y químicos agrícolas, que aparte del oxígeno, inhiben la digestión por que destruyen las bacterias metanogénicas. (Gonzabay y Suarez, 2016, p. 38)

Cuadro 11. Concentración inhibidora de inhibidores comunes

Inhibidores	Concentración inhibidora
SO ₄	5000ppm
NaCl	40000ppm
Nitrato (Según contenido de nitrógeno)	0,05 mg/l
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/
Nitrato (Según contenido de nitrógeno)	200-500 mg/l
CN	25mg/l
Detergente sintético	20-40 mg/l
Na	3500-5500 mg/l
K	2500- 4500 mg/l
Ca	2500-4500 mg/l
1000-1500 mg/l	1000-1500 mg/l

Fuente: (Gonzabay y Suarez, 2016, p. 38)

Aparte de la inhibición a causa de los ácidos, la fase metanogénica es inhibida por varias sustancias tóxicas. Estos incluyen los metales pesados, el cadmio, el cobre, el cromo, el níquel, el plomo y el zinc. (Gonzabay y Suarez, 2016, p. 38)

4.9. Relación Carbono / Nitrógeno

La relación carbono-nitrógeno debe estar en una proporción de entre 20 y 30 partes del primer elemento por cada parte del segundo. Si la proporción de nitrógeno aumenta la producción de biogás puede disminuir debido a la formación de amoníaco, el cual se genera durante la degradación anaeróbica de urea o proteínas. El amoníaco libre puede ser inhibitorio para la fermentación anaeróbica y tóxico para las bacterias metalogénicas. (Rong, 2006, p. 48).

En este sentido no se recomienda utilizar un solo tipo de sustrato. Lo ideal es, por el contrario, combinar materiales ricos en nitrógeno con materiales abundantes en carbono para obtener un buen balance de nutrientes que promueva el adecuado crecimiento de los microorganismos que degradan la materia orgánica dentro del biodigestor y, de esta manera, aumentar la productividad del mismo (Guevara, 1996, p. 40).

Si hay exceso de nitrógeno, se produce amoníaco en grandes cantidades el cual es un inhibidor, si por el contrario existe poco nitrógeno las bacterias no se multiplican y por lo tanto se limitará la producción de biogás. (Currie, 1991, Mencionado por Téllez, 2008, p.11)

Cuadro 12. Relación C/N de residuos animales

Residuos animales	%C	%N	C/N
BOVINOS	30	1,3	25:01
EQUINOS	40	0,8	50:01
OVINOS	35	1	35:01
PORCINOS	25	1,5	16:01
CAPRINOS	40	1	40:01
CONEJOS	35	1,5	23:01
GALLINAS	35	1,5	23:01
PATOS	38	0,8	47:01
PAVOS	35	0,7	50:01
EXCRETAS HUMANAS	2,5	0,85	03:01

Fuente: (Global Evioment Facility, 2001)

5. Sólidos orgánicos

5.1. Residuos orgánicos

Estos tipos de residuos son aquellos que se descomponen naturalmente transformándose en otro tipo de materia orgánica, son biodegradables. (Guerrero *et al* mencionado por García y Gómez, 2016, p. 24).

La producción de desechos sólidos se puede medir en valores unitarios como gramos kilogramos y toneladas de residuos sólidos por habitante por día. En relación a la producción de residuos sólidos domésticos en ciudades pequeñas se considera que cada habitante puede producir 0,1 a 0,4 Kg. /hab.-día, incluso 0,8 Kg. /hab.-día. (López, 2008, p.6-7)

Según el mismo autor, el almacenamiento debe seguir las siguientes recomendaciones:

- almacenar los desechos sólidos en un recipiente con tapa
- evacuar los desechos 3 veces por semana como máximo
- usar recipientes resistentes a la humedad
- evitar que el agua de lluvia entre al recipiente
- reciclar los residuos.

5.2. Productos de biodigestión

5.2.1. El biol

El biol es un fertilizante líquido que sustituye completamente el fertilizante químico. Si se filtra, el biol puede ser utilizado como fertilizante foliar en la mochila, o vaciarse directamente al suelo y a los canales de riego. Los productores que lo emplean mencionan que su producción de cultivos aumenta entre 30% a 50%. Además, el biol protege contra los insectos y permite recuperar las plantas afectadas por la helada. (Martí 2015. P. 20), que contiene nutrientes y hormonas de crecimiento como producto de la fermentación o descomposición anaeróbica (sin oxígeno) de desechos orgánicos de origen animal y vegetal. (Mamani *et al.* p.1).

Siendo una fuente de fitorreguladores que se obtiene como producto del proceso de descomposición anaeróbica de los desechos orgánicos en biodigestores, actúa como bioestimulante orgánico en pequeñas cantidades y es capaz de promover el crecimiento y desarrollo de las plantas (Colque et al, 2005, p. 2).

5.2.1.1. Ventajas del biol

Según (Mamani *et al.* S.f. p. 3), las ventajas que tiene el biol son:

- Promueve las actividades fisiológicas y estimula el crecimiento y desarrollo de las plantas
- Aumenta el rendimiento y mejora la calidad de los productos
- Mejora el vigor del cultivo, lo cual ayuda a soportar con mayor eficacia del ataque de plagas y enfermedades
- Promueve la recuperación del cultivo luego de un daño por heladas y/o granizadas
- Es un producto orgánico porque solo se requiere de insumos naturales para su elaboración
- No existe una receta única para su elaboración, los ingredientes pueden variar.
- Su preparación y preservación es fácil
- Tiene bajo costo
- Al ser un producto natural, su aplicación es fácil y no se necesita su protección

Cuadro 13. Composición de Biol de diferentes fuentes

Componente	Biol de estiércol de vacuno	Biol de mezcla de sustratos : estiércol de vacunos y restos de comida casera	Biol de banano promedio hojas, tallos y frutos	Biol de estiércol de vacuno
pH	7,96	8,1	No menciona	6,7-7,9
Materia seca	4,18%	4,2	No menciona	1,40%
Nitrogeno total	2,63 g/Kg	2,4 g/Kg	0,2 g/Kg	0,9 g/Kg
NH ₄	1,27 g/Kg	1,08 g/Kg	No menciona	No menciona
Fosforo	0,43 g/Kg	1,01 g/Kg	0,076 g/Kg	0,048 mg/Kg
Potasio	2,66 g/Kg	2,94 g/Kg	4,2 g/Kg	0,29 mg/Kg
Calcio	1,05 g/Kg	0,5 g/Kg	0,056 g/Kg	2,1 g/Kg
Magnesio	0,38 g/Kg	No menciona	0,131 g/Kg	0,14%
Sodio	0,404 g/Kg	No menciona	2,1 g/Kg	No menciona
Azufre	No menciona	No menciona	6,4 mg/Kg	0,33 mg/l
Carbono	No menciona	No menciona	1,1 /Kg	0,23- 0,30
Aluminio	No menciona	No menciona	0,04 mg/Kg	No menciona
Boro	No menciona	No menciona	0,56 mg/Kg	No menciona
Zing	No menciona	No menciona	No menciona	0,05 mg/l

Fuente: (Potsch y Much, 2004)

5.2.2. Bioabono

Otro producto del proceso de biodigestión es el bioabono, en fase líquida (biol) como en fase sólida (biosol). Es una alternativa que reemplaza los fertilizantes sintéticos usados en plantaciones agrícolas. El bioabono se encuentra degradado, por tanto, los nutrientes son rápidamente asimilados por los suelos y plantas, esto es una ventaja con respecto a la aplicación directa de residuos agrícolas sobre los suelos. Del efluente de salida aproximadamente 90% corresponde al biol y el 10% al biosol, estos porcentajes varían según los residuos a fermentar y del método de separación empleado. Siendo un fertilizante sólido (sólidos en suspensión) es parecido al compost. El Biosol permite que los cultivos sean fortalecidos y ocurra un mejor rendimiento, mejorando la estructura del suelo y la capacidad de retención de la humedad del mismo favoreciendo la actividad biológica, el biosol inhibe el crecimiento de hongos y bacterias que afecten a las plantas. (Vargas, 2014, p. 11).

Cuadro 14. Resultado de la comparación de medias por el método de t student

Métodos t- student comparación de medidas					
Parámetros		Medidas	t calculado	t tabulado	Diferencias significativas
Nitrógeno	Biol	6625.00	0.098	1.943	No
	Biosol	6000.00			
Fosforo	Biol	250.92	0.030	1.943	No
	Biosol	256.78			
Potasio	Biol	1152.37	0.53	1.943	No
	Biosol	1638.60			

Fuente: (Cabos et al, 2019 p. 1172)

El residuo orgánico que se descarga del biodigestor es un lodo-líquido fluido de excelentes propiedades fertilizantes, el cual está constituido por la fracción orgánica que no alcanza a degradarse y por el material orgánico agotado. Su constitución puede variar mucho, dependiendo de las variaciones en el contenido de la materia orgánica utilizada para alimentar el biodigestor y del tiempo de residencia de dicho material dentro de él (Moncayo 2007. Mencionado por Cabos et al. 2019, p. 1173).

Según (Patrick *et al.*, 2006) los 3 principales elementos que necesitan las plantas son el Nitrógeno (N) que promueve el crecimiento de la planta, Fósforo (P) que favorece la maduración de flores y frutos, además de fomentar su perfume y dulzor y el potasio (K), quien es el responsable de la multiplicación celular y de la formación de tejidos más resistentes a la sequía y las heladas. Estos elementos son los principales nutrientes vegetales y las plantas los requieren en grandes cantidades para su buen desarrollo, por esto es necesario volver a incorporarlos al suelo con regularidad como fertilizante.

Según (Botero y Thomas 1987. Mencionado por Soria *et al.*, 2001, p. 356.), la composición del bioabono en promedio tiene 8,5% de materia orgánica, 2,6% de nitrógeno, 1,5% de fósforo, 1,0% de potasio y un pH de 7,5. Que, al comparar estos valores con los resultados demostrados anteriormente, se verificó que efectivamente en el bioabono las diferencias de concentraciones de NPK son determinantes. Siendo el N en más concentración.

Se ha obtenido valores de referencia donde se dan los valores aproximados de la composición en los principales macronutrientes, pero se debe tener en cuenta que estos valores son sólo indicativos según el tipo de alimentación, raza, manejo, etc. que tengan los animales y el tratamiento que sufra el estiércol antes y después de su digestión; estos valores pueden variar en forma significativa, la concentración de N, P y K en los Bioabonos

(biol y biosol), se obtuvo más concentración de Nitrógeno (N), esto explica lo mencionado anteriormente: la variación de las concentraciones debido al tipo de alimentación y otros factores. También cabe mencionar que, en estiércol de ave, en los valores de referencia, el Nitrógeno (N) está en mucha más concentración que en el ganado vacuno (Hilbert, 2006, p. 40).

(García 2011. p. 34), Es el resultado de separar la parte sólida del fango resultante de la fermentación anaeróbica dentro del Biodigestor. Dependiendo de la tecnología empleada, puede contener entre un 10 y un 25% de humedad, que es en sí misma BIOL residual. Su composición depende de los residuos que se emplearon para su elaboración.

- Es un fertilizante sólido similar al compost.
- Puede emplearse sólo o en conjunto con compost, humus o con fertilizantes químicos.
- Se emplea entre 2 a 4 Ton/ha dependiendo del tipo de cultivo y el tipo de suelo.
- Se puede incluir junto con el Biol en la preparación del suelo antes de colocar las semillas.

5.2.2.1. Ventajas de la aplicación de Bioabono

Según, (García, 2011, p. 35), las ventajas que presenta el biosol son:

- Fortalece los cultivos, mejorando los rendimientos.
- Permite el uso intensivo del suelo mejorando a la vez la estructura y la calidad del mismo.
- Confiere a los suelos arenosos una mayor cohesión mejorando con ello la retención de los nutrientes del suelo.
- Mejora la estructura del suelo, y la capacidad de retención de la humedad del mismo, favoreciendo la actividad biológica en el mismo.
- Mejora la porosidad y por consiguiente la permeabilidad y ventilación.
- Puede ser combinado con la materia que va a ser compostada, con el fin de acelerar el proceso de compostaje.
- Reduce la necesidad del abono. Usualmente se emplean 2 a 4 Ton/ha. Si se empleara sólo estiércol se necesitaría de 15 a 30 Ton / ha. Y si se empleara compost, de 10 a 20 Ton / ha. dependiendo del tipo de cultivo y del tipo de suelo.
- Inhibe el crecimiento de hongos y bacterias que afectan las plantas

- Reduce la erosión del suelo.
- Cuenta con mayor disponibilidad de nutrientes (N, K, P, Fe y S)

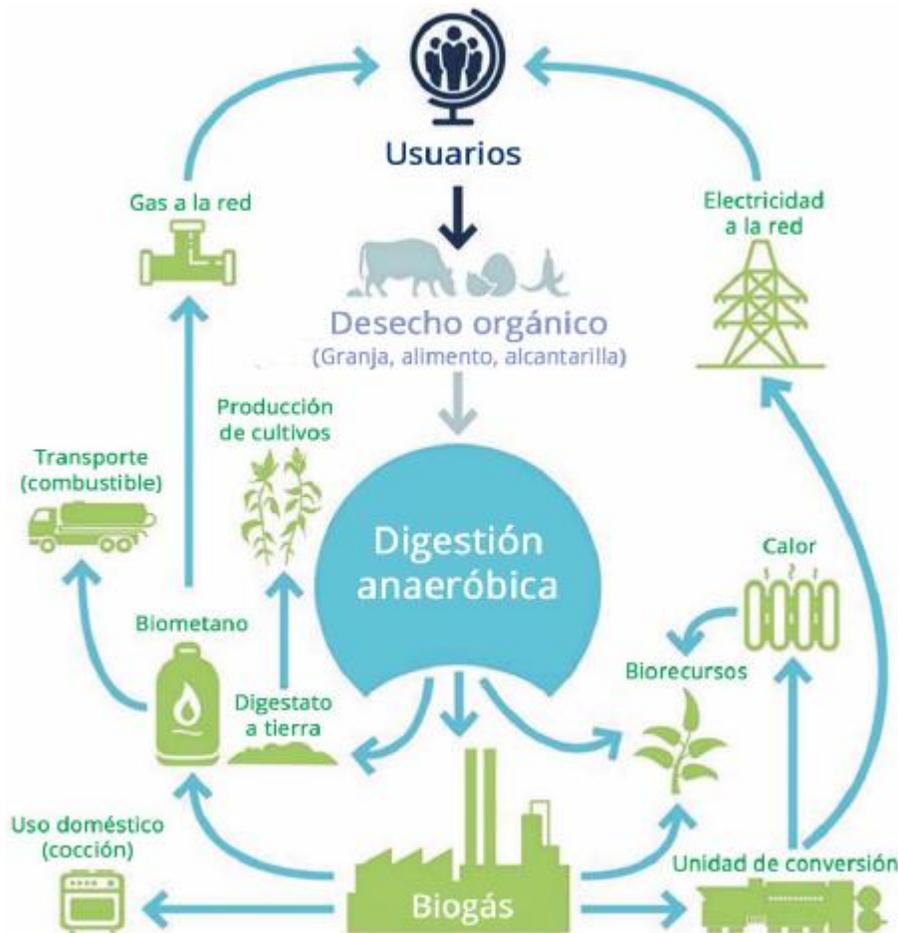
6. Biogás

El biogás es una mezcla compuesta de CH₄, CO₂ y otros gases en menos proporción, la cantidad de CH₄ contenida en el biogás depende del sustrato o materia prima y las condiciones en las que se llevó a cabo la biodigestión, por lo que las proporciones de sus componentes varían mucho; algunos autores señalan un rango de CH₄ de 55 a 70% (FAO, 2011).

El biogás se obtiene al reciclar los desechos orgánicos de alimentos, residuos agrícolas, cultivos energéticos, pasto, residuos de cultivos, entre otros., la digestión anaeróbica extrae la energía en forma de biogás y el resto se convierte en biofertilizante (CEPAL, 2019).

En la figura siguiente se describe gráficamente el ciclo del biogás, desde su origen procesamiento y sus posibles utilidades:

Figura 2. Ciclo biológico del biogás



Fuente: World Biogas Association, Global Food Waste Management, 2018.

6.1. Rendimiento de biogás por tipo de biomasa

El rendimiento en biogás que se refleja en el volumen producido por unidad de material potencialmente digerible también es muy variable y depende de la composición de la materia prima pero también de las condiciones del proceso de biodigestión: como la temperatura, velocidad de alimentación, tiempo de retención y tipo de digestor. Los datos del cuadro y del diagrama siguiente muestran las cantidades y composición del gas obtenido según la naturaleza del material digerido en condiciones mesofílicas. (CEPAL, 2019)

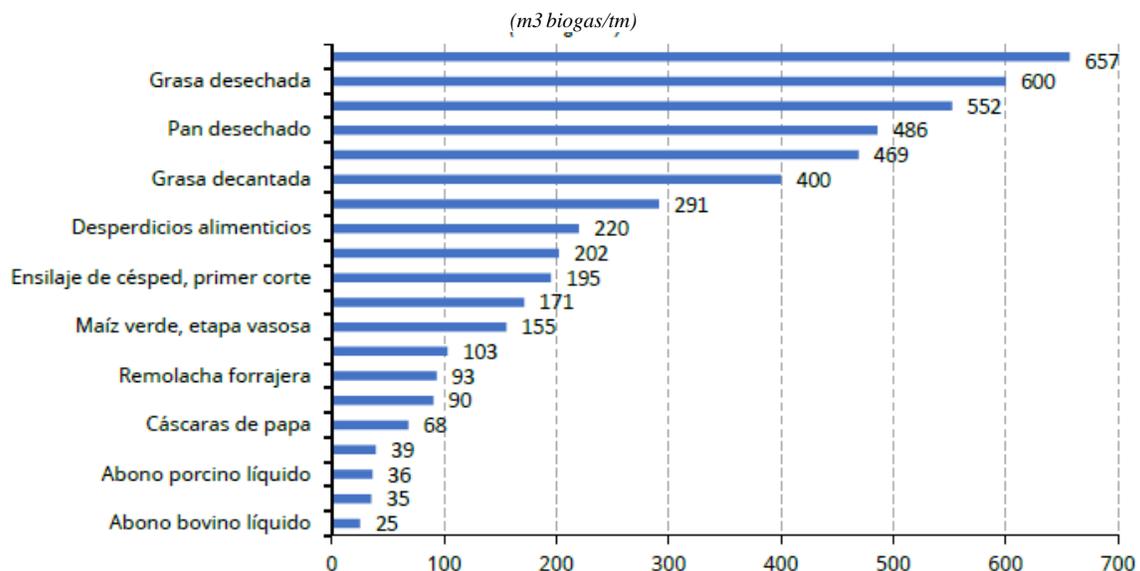
Cuadro 15. Rendimiento de biogás por tipo de biomasa

Estiércol	Relación C/N	Volumen del gas m ³ /día/año
Bovino (500 kg)	25:1	0.04
Porcino (50 kg)	13:1	0.06
Aves (2kg)	19:1	0.08
Ovino (32 kg)	35:1	0.05
Caprino (50Kg)	40:1	0.05
Conejo	13:1	0.06
Excreta humana	3:1	0.06

Fuente: M.T. Varnero y J. Arellano, *Aprovechamiento Racional de Desechos Orgánicos*, (1990).

El biogás no solo se obtiene de la digestión anaeróbica del estiércol del ganado, animales de granja y excretas humanas, también se obtiene de residuos de cultivos; cultivos energéticos; alimentos domésticos, desechos de jardín, aguas residuales industriales, lodo municipal de aguas residuales y la fracción orgánica de residuos sólidos municipales (CEPAL, 2019)

Figura 3. Rendimiento potencial de biogás por tipo de biomasa



Fuente: World Biogas Association, *Global Food Waste Management*, (2018).

6.2. Composición y características

El biogás en una mezcla de varios gases, sus características han sido resumidas en el siguiente cuadro:

Cuadro 16. Características del biogás

Características	CH ₄	CO ₂	H ₂ – H ₂ S	Otros	Biogás 60/40
Proporciones % volumen	55 – 70	27 - 44	1	3	100
Valor calórico Mj/m ³ kCal/m ³	35,8 8600	- -	10,8 2581	22 5258	21,5 5140
Ignición % en aire	5 – 15	-	-	-	6 - 12
Temp. Ignición en °C	650 – 750	-	-	-	650 -750
Presión crítica en Mpa	4,7	7,5	1,2	8,9	7,5 – 8,9
Densidad nominal en g/l	0,7	1,9	0,08	-	1,2
Densidad relativa	0.55	2,5	0,07	1,3	0,83
Inflamabilidad Vol. En % aire	5 -15	-	-	-	6 -12

Fuente: CEPAL, (2019)

6.3. Diferencias entre el biogás y el gas natural

En comparación con el gas natural que también es un gas que contiene principalmente CH₄, el contenido mínimo de metano en el gas natural en Bolivia varía entre 80 a 90 % de acuerdo a la página de YPF. En el cuadro siguiente se hace una comparación entre el biogás y otros gases combustibles, CEPAL, (2019)

Cuadro 17. Equivalente de energía: biogás y otros combustibles fósiles

PROPIEDADES	Biogás	Gas Natural	Gas Propano	Gas Metano
Valor calorífico (KWh/m ³)	7.00	10.00	26.00	10.00
Densidad	1.08	0.700	2.01	0.72
Temperatura de encendido (°C)	687	650	470	650

Fuente: PNUD, FAO y GEF, *Manual de Biogás*, Santiago, Chile, (2011)
 a Composición del biogás CH₄(65%), CO₂ (35%).

El biogás crudo puede quemarse en una serie de artefactos para calentar o para iluminar descomponiéndose principalmente en CO₂ y H₂O.

Cuadro 18. Comparación entre las propiedades del biogás y el gas natural

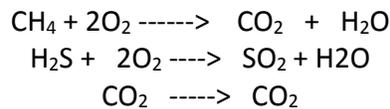
Parámetros		Biogás (60% CH ₄ , 38% CO ₂ y 2% de otras trazas)	Gas Natural
Poder calorífico	MJ/m ³	21,5	36,14
Densidad	Kg/m ³	1,21	0,82
Velocidad de ignición máxima	m/s	0,25	0,39
Punto de Rocio	°C	60 - 160	59

Fuente: Wellinger & Lindber (2000)

6.4. Poder calorífico del biogás

Aunque el poder calorífico del biogás depende de la concentración que este posea de CH₄, se establece que 1m³ de biogás con aproximadamente de este posee un 65% de CH₄ equivale a 6,4 kW-1 de energía o 21.6 MJ/M³. Este valor corresponde, o se asemeja, aproximadamente a medio litro de diésel, a 0,63 litros de gasolina o a 1,61 kg de leña (Viquez; 2009)

La combustión completa sin el exceso de aire y con oxígeno puro, puede ser representada por las siguientes ecuaciones químicas:



El requerimiento de aire mínimo sería del 21% pero esta cifra debe ser aumentada para lograr una buena combustión. La relación aire-gas puede ser ajustada aumentando la presión del aire, incrementando la apertura de la válvula de salida de gas (el biogás requiere de una apertura 2 a 3 veces mayor a la utilizada por el metano puro y modificando la geometría del paso de aire desde el exterior).

Debido al contenido de dióxido de carbono, el biogás tiene una velocidad de prop.ación de la llama lenta, 43 cm/seg y por lo tanto la llama tiende a escaparse de los quemadores.

La presión para un correcto uso del gas oscila entre los 7 y los 20 mbar. Se debe tener especial cuidado en este aspecto debido a que se deberán calcular las pérdidas de presión de salida del gasómetro (adicionándole contrapesos en el caso de gasómetros flotantes).

Las cocinas y calentadores son fácilmente modificables, agrandando el paso del gas de los quemadores. La amplia disponibilidad de este tipo de equipos hace promisorio e interesante su utilización a gran escala.

Las lámparas a gas tienen una muy baja eficiencia y el ambiente donde se las utilice debe estar adecuadamente ventilado para disipar el calor que generan.

El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto nafteros como diesel. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, por otro lado, una desventaja es su baja velocidad de encendido.

En los motores de Ciclo Otto el carburador convencional es reemplazado por un mezclador de gases. Estos motores son arrancados con nafta y luego siguen funcionando con un 100% de biogás con una merma de la potencia máxima del 20% al 30%.

A los motores de Ciclo Diesel se les agrega un mezclador de gases con un sistema de control manteniendo el sistema de inyección convencional. De esta manera estos motores pueden funcionar con distintas proporciones de biogás diesel y pueden convertirse fácil y rápidamente de un combustible a otro lo cual los hace muy confiables. El gasoil no puede ser reemplazado en los motores funcionando a campo del 85% al 90%, debido a que la autonomía conseguida menor comparada con la original.

La proporción de H₂S en el biogás causa deterioros en las válvulas de admisión y de escape de determinados motores obligando a un cambio más frecuente de los aceites lubricantes. El grado de deterioro en los motores varía considerablemente y los resultados obtenidos experimentalmente suelen ser contradictorios.

Los motores a biogás tienen amplio espectro de aplicación siendo los más usuales el bombeo de agua, el picado de raciones y el funcionamiento de ordeñadoras en el área rural. El otro uso muy generalizado es su empleo para activar generadores de electricidad. (Hilbert)

En estos casos la potencia mecánica provista por el eje del motor es aprovechada para generar electricidad a través de un generador. Simultáneamente y por medio de una serie de intercambiadores de calor ubicados en los sistemas de refrigeración (agua y aceite) del

motor y en la salida de los gases de escape, se recupera la energía térmica liberada en la combustión interna. (Hilbert, 1990)

6.5. Acondicionamiento del biogás

El gas tal cual sale del digestor debe ser acondicionado a fin de asegurar un permanente y buen funcionamiento de los equipos que se alimentan con él. A pesar de que algunos de estos acondicionamientos no son necesarios en todos los casos, otros como el drenaje del agua de condensación deberá realizarse siempre.

El acondicionamiento consiste en tratar el biogás con el fin de retirar las trazas de otros gases que no sea el metano, de esta manera elevamos la concentración del metano en el biogás obteniendo “biometano” y mejorando el poder calorífico y estandarizar la calidad del gas. La razón principal para acondicionar o purificar el biogás es la necesidad de satisfacer los requisitos de las aplicaciones del biogás. (CEPAL, 2019)

6.5.1. Remoción del dióxido de carbono (CO₂)

La eliminación del CO₂ aumenta el valor calorífico del biogás asemejándose más al gas natural. Al usar técnicas de remoción de CO₂, es importante mantener bajas pérdidas de metano por razones económicas y ambientales. Hay diversos métodos de remoción, los más comunes son la absorción o adsorción, la separación criogénica y la separación de membrana. En los procesos de absorción, el CO₂ y el H₂S son simultáneamente removidos debido a la alta polaridad del CO₂ y el H₂S y la no polaridad del CH₄. El agua es el solvente más común para purificar el biogás comprimido (4 a 7 bares). (CEPAL, 2019)

El CO₂ es considerado un contaminante ya que no tienen un valor energético como CH₄ conlleva a que el biogás no tenga una alta eficiencia como combustible. Su remoción es necesaria para que el biogás presente un alto valor energético. Además, debe ser eliminado para obtener alto porcentaje de metano que asegure una calidad y alcanzar especificaciones para ser utilizado como combustibles de vehículos y motores para la generación de electricidad (Nozic, 2006; Persson, 2006)

6.5.2. Remoción de H₂S

El sulfuro de hidrogeno (H₂S) es el componente del biogás cuya eliminación es motivo de investigación. Este compuesto al reaccionar con agua forma ácido sulfúrico que es altamente corrosivo en equipos metálicos para la utilización de biogás. Por otro lado, el H₂S

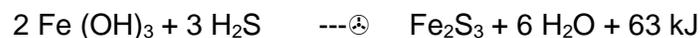
es altamente inflamable, por lo que con concentraciones en el aire 4.3 y 46%, puede generar una explosión por ignición. A parte de los peligros generados por su reactividad, es un gas que se puede considerar contaminante para el ambiente generando malos olores. Así mismo este gas se convierte en dióxido de azufre (SO₂), otro contaminante toxico que contribuye al fenómeno de lluvia acida. Con respecto a nivel de seguridad personal se debe considerar los peligros a la salud humana, ya que el sulfuro de hidrogeno es un gas de elevada toxicidad (Acosta et al., 2009; Perez y Villa, 2005; Horikawa et al, 2004; Mandavia, 2007).

Una exposición a bajas concentraciones, su olor se deja de percibir por lo que es imposible detectar cuando se están inhalantes concentraciones mas altas y toxicas (1000 ppm), que puede llevar a la muerte con tan solo 2 o 3 minutos de exposición (Acosta et al., 2009; Perez y Villa, 2005; Horikawa et al, 2004; Mandavia, 2007).

El método más simple para la desulfuración es agregar oxígeno o el aire directamente en la cámara de digestión. Con este método, el nivel de H₂S se puede reducir por arriba del 95% a niveles menores de 50 ppm, sin embargo, depende de la temperatura, lugar y cantidad de aire agregado y del tiempo de reacción. El nivel de H₂S se puede reducir de 3.000 a 5.000 ppm hasta 50 a100 ppm, con este método ayudamos también en la remoción del amoniaco (CEPAL, 2019)

Determinados equipos requieren que el gas a utilizar se encuentre libre de SO₂, debido a que el mismo combinado con el agua da como resultado ácido sulfhídrico que corroe las partes vitales de algunas instalaciones.

El método más utilizado es hacer pasar el gas por un filtro que contiene hidróxido de hierro. El H₂S del gas se combina con el hierro formando sulfuro de hierro según la fórmula descrita más abajo. Esta reacción es reversible y el hidróxido de hierro puede ser regenerado exponiendo el sulfuro al aire con cuidado debido a que la reacción es exotérmica, liberando 603 kJ



6.5.3. Remoción de trazas de gases

el biogás contiene un rango amplio de compuestos (H₂S, siloxanos, materia orgánica) con concentraciones que cubren algunos órdenes de magnitud. Si el material de donde proviene

el biogás son aguas residuales y no se descomponen en una planta de tratamiento convencional, estas aguas contienen una cantidad significativa de siloxanos, aunque una gran parte se volatiliza a la atmósfera durante el tratamiento, una cantidad significativa se fija por adsorción a los flocos del lodo. El método más frecuentemente usado para quitar los siloxanos es la adsorción por carbón activado. (CEPAL, 2019).

6.5.4. De biogás a biometano

El biometano es la forma del biogás después de procesos de refinación o purificación, una forma mejorada, el biogás con sus características puede ser intercambiable con el gas natural convencional, es decir, tiene los mismos usos finales que el combustible fósil. Para que el biogás llegue a ser biometano, se remuevan todos los componentes dañinos, e incluso, los microorganismos patógenos para su uso doméstico (Aparicio Ariza , 2015).

Como el biometano y el gas natural presentan características energéticas similares, en la tabla siguiente pueden ver las ventajas frente al gas natural.

Cuadro 19. Comparativa de Gas Natural y Biometano

GAS NATURAL	BIOMETANO
Combustible de origen fósil (no renovable)	Combustible de origen renovable
Toma millones de años la descomposición de la materia orgánica para la producción de gas natural	Dada la materia prima necesaria para la obtención de biogás, este se producir en cualquier parte del mundo.
Interviene drásticamente en el ambiente, mediante la perforación de los suelos y la destrucción de los hábitats.	Su producción no afecta el ambiente, ni representa un gran riesgo de polución o pérdida de biodiversidad
La combustión del gas natural incrementa las emisiones de CO ₂ .	El Biometano también emite CO ₂ a la atmosfera, pero estas emisiones corresponden a las mismas que tendría la materia orgánica en descomposición.

Fuente: Aparicio Ariza , (2015)

En la siguiente tabla se resumen las impurezas más comunes del biogás, sus posibles consecuencias en caso de no ser eliminadas y la(s) tecnología(s) que se puede(n) implementar para su remoción (Aparicio Ariza, 2015).

Cuadro 20. Contaminantes y tratamiento del biogás para la obtención

Impureza	Posible impacto	Tratamiento
Agua	Corrosión de tanques de almacenamiento, compresores y motores debido a la reacción con H ₂ S, NH ₃ y CO ₂ para la formación de ácidos. Acumulación de agua en tuberías. Condensación y/o congelación debido a altas presiones.	Separación física: Condensación · Separación química: Técnicas de absorción y absorción mediante sustancias químicas.
Polvo	Obstrucción debido a la deposición (Transformación de gas en sólido) en tanques de almacenamiento de gas y compresores.	Las técnicas de secado incluso favorecen la remoción de polvo
H ₂ S	Corrosión en tanques de almacenamiento de gas, en compresores y en motores. Concentraciones tóxicas de H ₂ S remanentes en el biogás. Formación de SO ₂ y SO ₃ debido a la combustión, los cuales son más tóxicos que el H ₂ S y pueden causar corrosión al contacto con el agua.	Remoción durante el proceso de digestión: · Dosificación de aire (oxígeno) al sistema de biogás para oxidar el H ₂ S en azufre elemental. · Adición de cloruro de hierro en el digestor para formar partículas precipitadas de FeS. Remoción después del proceso de digestión: · Adsorción usando óxido o hidróxido de hierro. · Absorción con líquidos · Separación por membranas. · Filtros biológicos · Adsorción mediante carbón activado.
CO ₂	Disminuye el poder calorífico	· Absorción física y química de CO ₂ . · Adsorción por oscilación de presión. · Adsorción por oscilación al vacío. · Separación por membranas. · Separación criogénica · Enriquecimiento biológico de metano.

Siloxanos	Formación de SiO ₂ y micro cristales de cuarzo debido a la combustión	<ul style="list-style-type: none"> · Absorción con solventes orgánicos. · Absorción en ácido fuerte. · Absorción en base fuerte · Adsorción con Silicagel · Adsorción con Carbón Activado · Separación criogénico
Hidrocarburos	Corrosión de motores debido a la combustión	Remoción mediante carbón activado
NH ₃	Corrosión cuando se disuelve en agua	El método más práctico y menos costoso es mediante carbón activado.
O ₂ / Aire	Peligro de explosión debido a la mezcla de altas concentraciones de oxígeno en el biogás.	<ul style="list-style-type: none"> · Remoción mediante membranas · Adsorción por oscilación de presión a baja temperatura Los anteriores métodos son costosos, razón por la cual, se recomienda prevenir cualquier introducción de aire al digestor mediante un monitoreo cuidadoso.
Cl-, F-	Corrosión en motores de combustión.	

Fuente: Aparicio Ariza, (2015)

6.6. Generación de electricidad

En el presente siglo, la producción de energía eléctrica se ha transformado hacia alternativas de producción energética, mediante un sinnúmero de prácticas amigables con el medio ambiente y el aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles de acuerdo a los Objetivos del Desarrollo Sostenible y como consecuencia de ello se ha creado un clima bastante favorable para el estudio, promoción e implementación de tecnologías como la de los biodigestores, ya que se ha visto que se puede obtener una mayor remuneración económica y beneficios conexos en la producción de energía eléctrica a partir de la producción de y así aprovechar de mejor manera y más eficientemente este combustible, sustituyendo las tradicionales fuentes energéticas no renovables, muchas de las cuales son cada vez más escasas y costosas;

convirtiendo la explotación del biogás en una actividad nueva, económica, más rentable y menos contaminante. Por otra parte, en relación a la energía eléctrica, se debe tener en cuenta que la provisión de este servicio debe alcanzar la mayor cobertura y llegar a todos los ciudadanos, lo cual evidentemente es un compromiso permanente de los gobiernos hacia la sociedad y esto convierte a la energía eléctrica en un “bien público”.

Se denomina energía eléctrica a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos de un circuito, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos (cuando se los pone en contacto por medio de un conductor eléctrico) y obtener trabajo. La energía eléctrica puede transformarse en muchas otras formas de energía, tales como la energía luminosa o luz, la energía mecánica y la energía térmica. La energía eléctrica se manifiesta como corriente eléctrica, es decir, como el movimiento de cargas eléctricas negativas, o electrones, a través de un cable conductor metálico como consecuencia de la diferencia de potencial que un generador esté aplicando en sus extremos.

La energía eléctrica es una forma de energía de transición (ni primaria ni final) extremadamente difundida actualmente y cómoda debido a sus posibilidades de conversión (calefacción, iluminación, energía mecánica, etc.) y en los últimos años también ha incursionado en el transporte. Proviene, en general, de la conversión, en centrales, de energía mecánica a energías eléctricas por medio de generadores (o alternadores). Cada vez que se acciona un interruptor, se cierra un circuito eléctrico y se genera el movimiento de electrones a través del cable conductor; las cargas eléctricas que se desplazan forman parte de los átomos de la sustancia del conductor, que suele ser de cobre o aluminio, ya que los metales (al disponer de mayor cantidad de electrones libres que otras sustancias) son los mejores conductores de la electricidad. La mayor parte de la energía eléctrica que se consume en la vida diaria proviene de diferentes fuentes primarias Renovables y NO renovables entre ellas el BIOGÁS. El aprovechamiento de la energía está ligado al desarrollo humano. La conexión de la humanidad con la energía empezó con el dominio del fuego. Hoy en día -sin embargo- existe una complejidad creciente en los temas energéticos. Se dispone de un número cada vez mayor de fuentes energéticas, redes energéticas más complejas, métodos de almacenamiento, etc.

En Bolivia, el uso del biogás para la generación de electricidad no tiene un frecuente empleo, pero con la promulgación del Decreto Supremo 4992 de “Generación Distribuida”; su utilización en la sustitución de combustibles fósiles como el fuel oil o diesel, para la generación de electricidad en motores de combustión interna o ciclo Otto podría cobrar una mayor preponderancia en los próximos años y permitiría la realización de diversos trabajos de investigación enfocados en la producción de electricidad a partir de la Biomasa; recordemos que el biogás puede ser utilizado para reemplazar la gasolina hasta en un 100 %, mientras que en motores a diésel sólo se logra un máximo de 80 %, debido a que la baja ignición del biogás no permite que haya explosión en este tipo de motores que carecen de bujías.

En ese contexto, se debe tomar muy en cuenta el concepto del autoabastecimiento eléctrico el cual puede extenderse a las esferas doméstica y comercial, en las que los sistemas de producción de BIOGÁS, eventualmente híbridos, podrían suministrar toda la electricidad necesaria para una determinada cantidad de usuarios. Lo cual puede darse en el caso de viviendas, granjas, agroindustrias, instalaciones turísticas y otras operaciones económicas que demanden cantidades moderadas de electricidad que, en combinación con equipos para el uso eficiente de electricidad, pueden ser económicamente viables en el corto, mediano y largo plazo.

6.6.1. El Sistema Interconectado Nacional (SIN)

El Sistema Interconectado Nacional que a la fecha de promulgación de la Ley de Electricidad 1604, abastece de electricidad a los departamentos de la Paz, Cochabamba, Santa Cruz, Oruro, Chuquisaca y Potosí y a los Sistemas Eléctricos que en el futuro se interconecten con éste. En el SIN, la potencia total instalada en 2021 es de 2,43 GW el suministro está dominado por la generación térmica (67%), mientras que la hidroeléctrica (30%), por su parte, la contribución de otras energías renovables es casi insignificante, ya que la eólica, solar y biomasa alcanzan alrededor del 3% y son las que tienen menor presencia en la matriz de generación si se compara con otros países sudamericanos (la capacidad hidroeléctrica media de ALyC es del 51%).

Por su parte, la cobertura de electricidad en áreas rurales se encuentra entre las más bajas de América Latina y mejorar este aspecto es un importante desafío hacia el futuro, ya que

se necesita del esfuerzo conjunto de los sectores público y privado. Como en otros países, el sector eléctrico de Bolivia está formado por el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y sistemas aislados de la red (conocidos como *Aislado*).

El sector eléctrico nacional, se caracteriza por una estructura productiva bastante compleja por ser muy centralizado y además la excesiva subvención para las termoeléctricas, las cuales denotan marcadas diferencias de costos de inversión y operación respecto a las tarifas. Este último punto es importante porque el consumo está geográficamente disperso y, por lo tanto, existen costos substanciales de transporte de electricidad. Además, el poder de negociación de las generadoras con los pequeños consumidores industriales y las familias, es suficientemente desigual como para que justifique una mejor regulación de precios.

Figura 4. Sistema Interconectado Nacional (SIN) Bolivia.



Fuente: Empresa Nacional de Electricidad.

6.6.2. Las Centrales Eléctricas

Como se ha dicho, para generar electricidad se necesita que la energía contenida en las materias primarias sea liberada. ¿Cómo se logra esto? Depende totalmente del tipo de central eléctrica del que se esté hablando:

“DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOABONOS, GAS METANO (CH₄) Y APROVECHAMIENTO EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

- Centrales termoeléctricas de ciclo convencional (carbón, gasóleo y gas natural): se quema carbón, gas natural o gasóleo. Al quemarse, elevan la temperatura de un depósito de agua. El agua se transforma en vapor que mueve una turbina, esta rotación mecánica genera electricidad a través de un alternador que transforma energía mecánica en eléctrica mediante la interacción de campos eléctricos y magnéticos. Este tipo de Centrales son las que más abundan en Bolivia (70%) y provocan enormes márgenes de subvención al Erario Nacional.
- Centrales nucleares y Centrales geotérmicas: el sistema de generación a través de transformación de energía mecánica en energía eléctrica es similar a las anteriores.
- Centrales hidroeléctricas: no necesitan calor, ya que este tipo de centrales son la evolución de los antiguos molinos. Lo que hacen es utilizar un salto de agua importante para mover una turbina hidráulica. Se suelen construir en presas y embalses.
- Parques eólicos: aquí es el viento el que mueve una turbina de la que se obtendrá la energía eléctrica.
- Centrales solares: hay de dos tipos. Las termo-solares lo que hacen es usar el calor del sol para calentar agua y utilizar el vapor generado para mover una turbina. Las fotovoltaicas lo que hacen es transformar directamente la energía solar en electricidad, gracias a las células fotovoltaicas.
- Centrales de biomasa: en este caso, el calor se genera tras quemar materia orgánica, ya sean vegetales o todo tipo de residuos (animales, industriales, agrícolas y urbanos), obteniéndose BIOGÁS el cual puede accionar motores a combustión o turbinas.

6.6.3. Generación de Electricidad

Como se ha visto, la generación de Energía Eléctrica, se produce en centrales capaces de producir electricidad a partir de energías primarias. Estas energías primarias pueden ser renovables (el viento, la radiación solar, el agua, la biomasa, la geotermia) o no-renovables (el carbón, el gas natural, el petróleo, el uranio). La gran diferencia entre renovables y no-renovables depende de la energía primaria que se está usando como combustible para

generar electricidad. La pregunta entonces es: ¿Hay que reponer dicho "combustible" a la naturaleza o no es necesario hacerlo porque lo ofrece gratis?

Actualmente las centrales más extendidas a nivel mundial, son no-renovables, ya que utilizan energías primarias que hay que extraer de la tierra (carbón, gas natural, uranio, petróleo). Pero se observa que el futuro se perfila mucho más renovable.

En el caso concreto de la generación a partir del biogás; puede ser utilizado como combustible, según el porcentaje de metano que posea; de acuerdo a datos estadísticos del Manual De Biogás, publicado por el PNUD, FAO, GEF (FAO 2011), cuando el biogás posee un contenido menor al 25% de CH₄, se debe extraerlo del biodigestor únicamente para ventearlo y diluirlo en la atmosfera, pues su poder calórico no hace rentable su uso como combustible. Si el contenido de CH₄ del biogás está entre aproximadamente 25 % a 40% se lo podría extraer para ser quemado en una antorcha, y si el contenido de CH₄ es mayor al 40% se lo puede utilizar como combustible, y en el caso de estudio del presente trabajo, como combustible para generar energía eléctrica.

Tomando como referencia el indicado Manual, se considera lo siguiente: "Al comienzo de las actividades del proyecto no se generará electricidad. Sólo después de varios meses de actividad del proyecto, después de realizar análisis precisos sobre el biogás y características de producción y de las evaluaciones económicas, se activaría el generador.

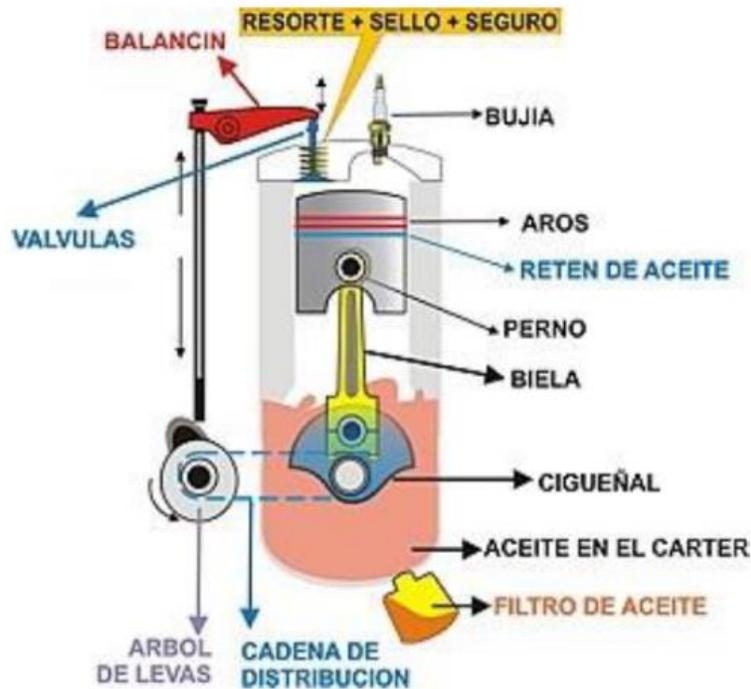
El uso de generadores con biogás se complica dependiendo de la calidad de este como combustible, por lo que se hace necesario al menos realizar un pre tratamiento de limpieza y secado para el biogás, además una selección muy cuidadosa del motor a elegir. Entre estos aparecen como mejores opciones los motores de combustión interna de mezcla pobre (lean-burn) de ciclo Otto y las micro-turbinas.

Un motor de combustión interna es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química producida por un combustible que en nuestro caso particular es el biogás generado en un relleno sanitario que arde dentro de una cámara de combustión, la parte principal de un motor.

Los principales motores son:

Motor ciclo Otto: cuyo nombre proviene del técnico alemán que lo inventó, Nikolaus August Otto, es el motor convencional de gasolina que se emplea en automoción y aeronáutico. Un esquema de este motor se muestra en la siguiente figura:

Figura 5. Esquema del motor ciclo Otto.



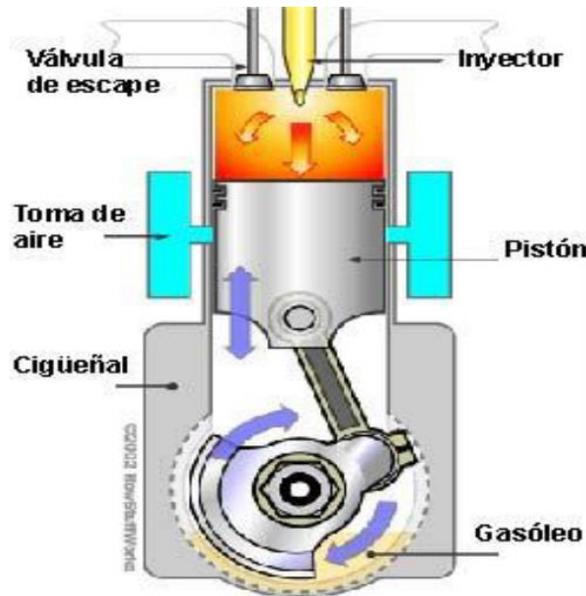
Fuente: J. Víquez, Remoción del sulfuro de hidrogeno, 2010 Autor: J. Víquez.

El biogás con un grado medio de pureza, se puede utilizar en motores de combustión interna (motores de ciclo Otto -gasolina- y motores diésel). Los motores de ciclo Otto pueden funcionar solamente con biogás, aunque necesitan de otros combustibles en el momento del arrancado. Los motores de ciclo diésel constan de un sistema mixto de biogás y diésel que permite utilizar distintas proporciones de ambos combustibles. Sin embargo, los motores de combustión interna tienen como desventaja principal las elevadas concentraciones de NOx y CO2 que emiten a la atmósfera

Motor ciclo Diésel: llamado así en honor del ingeniero alemán nacido en Francia Rudolf Diésel, funciona con un principio diferente y suele consumir gasóleo. Se emplea en instalaciones generadoras de energía eléctrica, en sistemas de

propulsión naval, en camiones, autobuses y automóviles. Un esquema de este motor se muestra en la siguiente figura:

Figura 6. Esquema del motor ciclo Diésel.



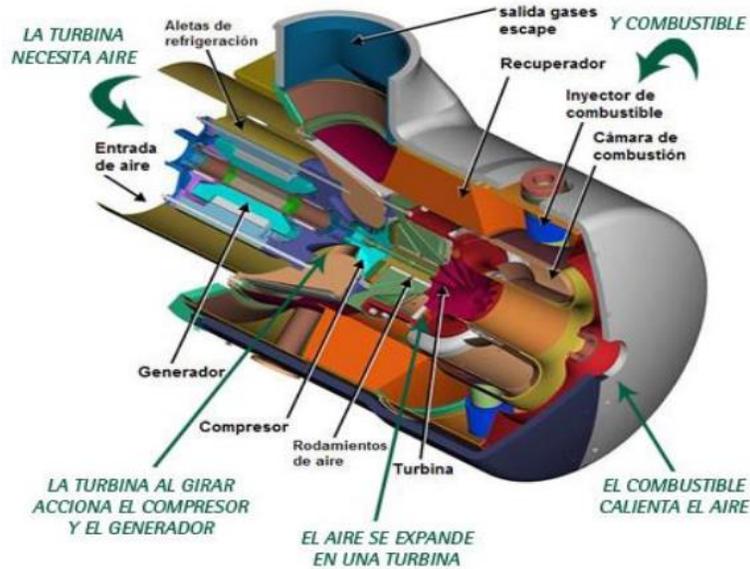
Fuente: J.R Marchant, Biotamb s.a., 2009 Autor: J.R Marchant

Tanto los motores Otto como los diésel se fabrican en modelos de dos y cuatro tiempos.

Micro turbinas: Son pequeñas turbinas a gas que queman CH_4 mezclado con aire a presión. Los gases calientes presurizados resultantes de la combustión son forzados hacia afuera de la cámara a través de una turbina haciéndola girar y movilizándolo el generador. La mayoría incluye un compresor, un recuperador de calor y varios elementos para el control de la combustión y de la conversión a energía eléctrica.

Presentan una serie de propiedades que las vuelven muy interesantes en el uso como electro generadores, entre las que destacan el ser capaces de manejar combustibles relativamente pobres, presentar bajos requerimientos de mantenimiento y tiempos de paro de máquina relacionados, no requieren de aceites lubricantes ni de enfriamiento, ocupan poco espacio, son modulares y fáciles de trasladar, no presentan mayores problemas de ruido y/o vibración y generan bajas emisiones con muy poco CO_2 y NO_x . En la Figura a continuación, se muestra un esquema de una micro-turbina.

Figura 7. Esquema de micro turbina.

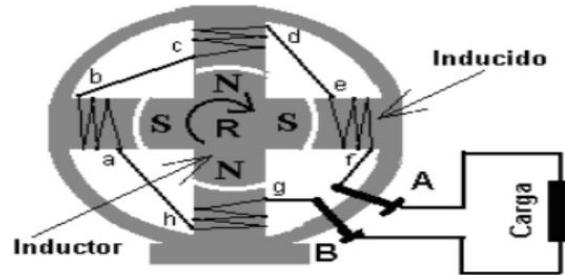


Fuente: J.R Marchant, Biotamb s.a., 2009 **Autor:** J.R Marchant.

6.6.4. El Alternador Eléctrico

El uso de un generador eléctrico acoplado a uno de los motores previamente descritos y explicados tiene relación a la potencia, confiabilidad y factores que intervienen directamente con respecto al motor ya que este es el punto crítico al ser el elemento el cual generará la fuerza mecánica la cual dará el movimiento al generador eléctrico el cual su parte constructiva se describe en la siguiente figura:

Figura 8. Esquema generador C.A.



Fuente: S. Pabón, overblog, 2010 Autor: S. Pabón

Un alternador es una máquina eléctrica, capaz de transformar energía mecánica en energía eléctrica generando una corriente alterna mediante un proceso de inducción electromagnética.

Los alternadores están creados, siguiendo el principio de que, en un conductor sometido a un campo magnético variable, durante un determinado tiempo se va a inducir una diferencia de potencial eléctrico o fuerza electromotriz, cuya polaridad depende del sentido del campo y el valor del flujo que lo atraviesa según lo establecen las Leyes de Faraday y Maxwell.

Un alternador de corriente alterna funciona cambiando constantemente la polaridad para que haya movimiento y genere energía. En el mundo se utilizan alternadores con una frecuencia de 50 Hz (Bolivia) o 60 Hz (Brasil, Venezuela, Colombia); es decir que, dependiendo del lugar, los alternadores eléctricos cambian su polaridad 100 o 120 veces por segundo.

Si el alternador, se utiliza para suministrar energía a la red, su velocidad de rotación se mantiene constante y por lo tanto se conserva la frecuencia f de la red. Su relación fundamental es: $f = (p * n) / 60$; donde n representa la velocidad de giro del rotor del alternador y p el número de pares de polos de dicho equipo.

De acuerdo al “Estudio De Factibilidad Para Implementar Una Central Eléctrica Aprovechando El Biogás Generado Por El Relleno Sanitario Del Inga” (pg. 40; Crisanto Perrazo, Luis) se considera lo siguiente: “Al comienzo de las actividades del proyecto no se generará electricidad. Sólo después de algunos meses de actividad del proyecto y después de realizar análisis precisos sobre el biogás y características de producción y de las evaluaciones económicas”

CAPÍTULO IV: MARCO METODOLÓGICO

Dentro de la investigación científica, uno de los aspectos fundamentales, especialmente dentro el enfoque cualitativo es el planteamiento del marco metodológico, donde se mostrará lineamientos claros de la investigación.

1. Tipo de investigación

Como el proyecto de investigación se trata de diseñar un biodigestor para la producción de bioabonos, gas metano (CH_4), y aprovechamiento en la generación de electricidad, para tal efecto dicho proyecto se elaboró mediante recolección de información primaria y secundaria, con toda la información obtenida el proyecto es de tipo aplicada y adaptativa, para que posteriormente dicho proyecto pueda ser implementado y aplicable para la producción de bioabonos, gas metano y electricidad.

2. Diseño de la investigación

Como el proyecto se trata de diseñar biodigestor para la producción de bioabonos, gas metano y electricidad, para lo cual se a la información primaria y secundaria, por tipo de investigación no a medita aplicar ningún diseño experimental, asimismo no se consideró variables de investigación al ser un proyecto de investigación sin experimentación.

3. Variables de investigación

Como el proyecto trata de diseñar un biodigestor para la producción de bioabonos, gas metano (CH_4), y aprovechamiento en la generación de electricidad, donde no se emplea ningún diseño experimental, por lo tanto en el presente proyecto de investigación no es necesario estipular los variables.

4. Población y muestra

De la misma manera las muestras se consideran en un trabajo de investigación experimental, por lo que en el presente estudio no se consideró dicho elemento.

5. Ambiente de la investigación

El proyecto de investigación se realizó en el ambiente de la unidad de institutos de cada Carrera, posteriormente se consolidaron los avances en un solo documento, y con una revisión de los docentes investigadores fue remitido al coordinador.

6. Técnicas e instrumentos

Para la elaboración del diseño del proyecto se utilizaron consultas bibliográficas, artículos científicos, visitas a proyectos de funcionamiento de biodigestores, videos sobre tipos de biodigestores, filtros de purificación de gas metano, y observación de información como un enfoque más apropiado en el presente modelo de investigación, además la aplicación de metas, aptitudes, creatividad como marco de referencia.

7. Procedimientos de la investigación

El proyecto de investigación se realizó bajo el siguiente procedimiento que se detalla a continuación:

Fase 1. Recolección de información

Inicialmente se realizó una planificación coordinada entre las carreras involucradas en el proyecto de la investigación.

Se recolectaron información referente al proyecto de diseño de un biodigestor para la producción de bioabonos, gas metano (CH_4) y aprovechamiento en la generación de electricidad de manera coordinada entre las tres carreras.

Se priorizaron información recolectada de las tres carreras, para contar con una información atenuada para el diseño del proyecto de investigación, lo cual fue consolidado en el presente documento.

Fase 2. Diseño del Proyecto

Con toda la información recolectada y priorizada se generó el diseño del tipo de biodigestor, tomando en cuenta el modelo, capacidad, material y partes funcionales, diseño orientado para desechos vegetales de domicilios.

“DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOABONOS, GAS METANO (CH_4) Y APROVECHAMIENTO EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

Una vez definida la cantidad de Biogás (gas metano CH₄) que entregue el sistema de Biodigestión, se procederá a dimensionar, ya sea el Motor a Combustión de CH₄ o alternativamente la Turbina a Vapor.

Se considerarán los principales parámetros de esta fase del proceso, como ser presión del metano, velocidad angular en el eje, torque y con ello la potencia mecánica en el eje de la máquina a cargo de entregar la energía mecánica.

Con toda la información obtenida, inmediatamente se procederá a diseñar y dimensionar la dinamo en caso de que se genere Corriente Continua o el Alternador en caso de generarse Corriente Alterna para la generación de Potencia Eléctrica Trifásica 230/400 v, 50 Hz.

Una vez diseñada la máquina se procederá a su construcción o directamente se podría adquirir una maquina prototipo.

CAPÍTULO V: RESULTADOS

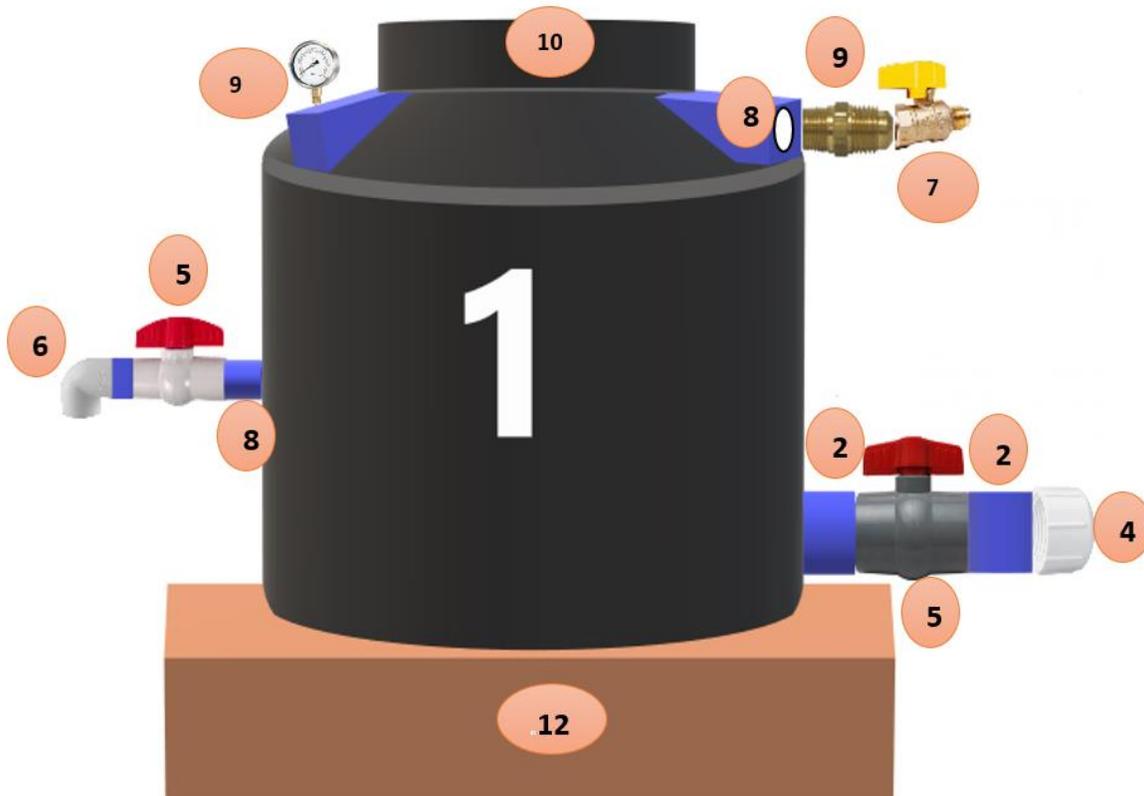
1. Diseño del biodigestor, filtros para limpieza de biogás y turbina para la generación de energía eléctrica

El diseño del proceso hasta la obtención de energía eléctrica esta dividida en parte: la primera que consta del diseño del biodigestor, la segunda que son el arreglo de filtros para la limpieza del biogás y obtención de biometano y el último, el diseño del equipo de generación de energía eléctrica.

1.1. Diseño del biodigestor

El diseño de biodigestor, se realizó de acuerdo a la investigación de tipos de biodigestores, implementados en la región del altiplano Boliviano, tomando en cuenta factores como el funcionamiento eficiente de los biodigestores, objetivos de tipos de biodigestores, temperatura, calidad y material de diseño disponible, sobre todo orientado para utilizar los desechos vegetales de cocina para transformar en bioabonos, biogás y generación eléctrica, de esta manera evitar desechos vegetales en las calles, avenidas, plazas, o simplemente como pérdida en el botadero, para lo cual si tiene el siguiente diseño.

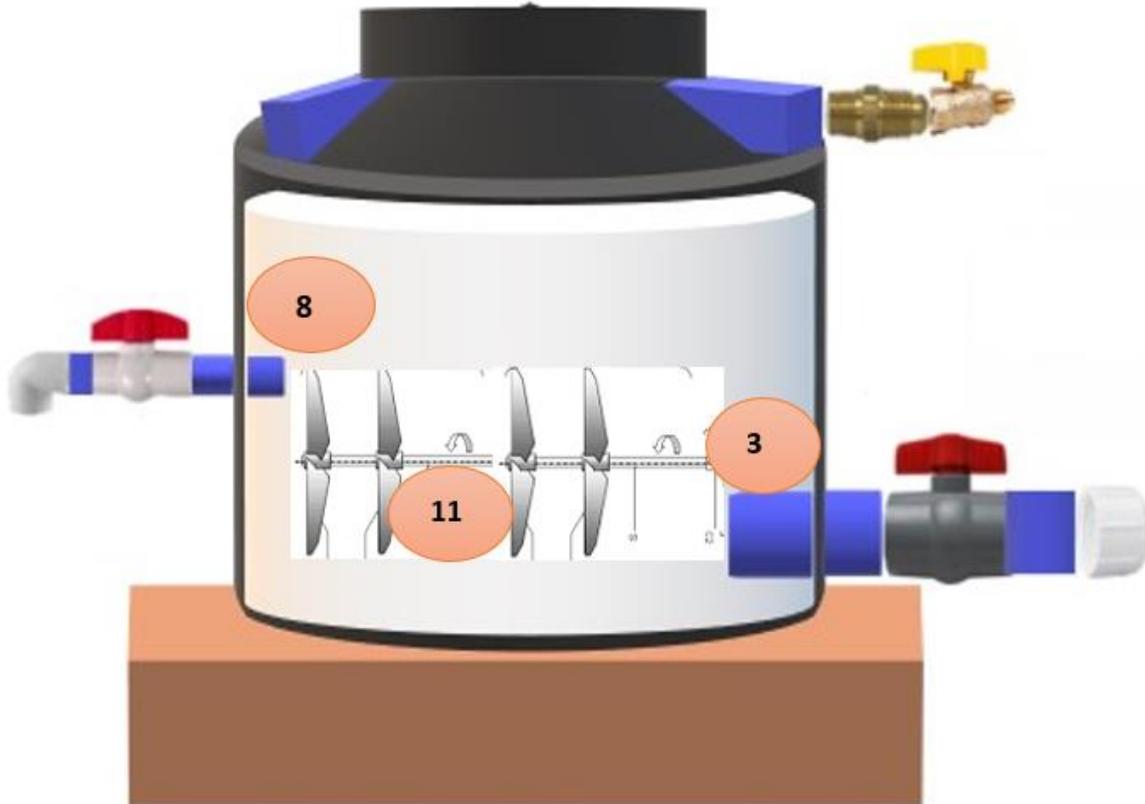
Figura 9. Diseño del biodigestor



Fuente: Elaboración propia

Para los biodigestores verticales con la finalidad de fermentar los desechos vegetales de cocina y según las experiencias artesanales, industriales, este tipo de digestores necesariamente debe contar con un agitador interno para la homogenización de desechos como se puede observar en figura 5.

Figura 10. Diseño del biodigestor con corte vertical.



Fuente: Elaboración propia

1.1.1. Partes del diseño del biodigestor

Para la construcción del biodigestor de tipo vertical se consideró todo el material de plástico, para evitar cualquier efecto de corrosión, el costo de manipulación y mantenimiento, de la misma manera se consideró las experiencias de construcción de biodigestores en las regiones del altiplano Boliviano, y de estación experimental de Kallutaca. Para tal efecto se muestra todo el material de construcción en el cuadro 21.

Cuadro 21. Materiales de construcción de un biodigestor

N°	DETALLE	IMAGEN
1	Tanque Campeon de 900Ltr.	
2	Niple de 4" PVC	
3	Copla de 4" PVC	
4	Tapa de 4" hembra PVC	
5	Llave de paso de 1" y 4" PVC	
6	Codos de 1" PVC	

7	Llave de gas	
8	Flange de 1" y 1/2"	
9	Manómetro	

1.1.2. Descripción del material de construcción del biodigestor

Tanque campeón de 900 litros

Para la construcción del biodigestor se utilizó un tanque de agua de capacidad de 900 litros de color negro con un espesor de 10 mm, una altura de 131 cm y un ancho de 101cm.

El tanque será utilizado para el depósito de una cierta cantidad de materia orgánica, estiércol de ganado, ceniza y agua donde se mezclarán de manera homogénea para así empezar con el proceso de la fermentación anaeróbica, producción del biogás, biol y bioabono.

Niple de 4" PVC

El niple de 4" de PVC de color blanco se encontrará en la parte lateral del tanque para la descarga de los residuos sólidos el cual pasa a través de la abertura que se encuentra a una altura de 5 a 10 cm del tanque desde el interior hacia el exterior el cual conectará con una copla en la parte externa para tener una mejor sujeción de esta y así evitar el ingreso de oxígeno.

Llave de paso PVC de 1”

Llave de paso PVC de 1” es un dispositivo de plástico el cual nos sirve para cortar el paso del flujo del biol el cual estará conectado con un niple de 1” y un flange PVC de 1” en las salidas de la llave.

Tubo PVC de 1”

El Tubo PVC de 1” es una pieza cilíndrica de color plomo nos sirve para unir el flange de 1” el cual conectará con el tanque para la descarga del biol desde el interior hacia el exterior del tanque y de allí se conectará con la llave de paso de 1”.

Codo PVC de 1”

El codo de PVC de 1” de color blanco se unirá con el niple PVC de 1” para la salida del biol.

Llave PVC de 4”

La llave PVC de 4” es un dispositivo de plástico de color café el cual nos sirve para cortar el paso del flujo de los residuos sólidos producto del proceso de la biodigestión el cual se unirá con niples de 4” en ambas salidas esto para la salida del bioabono y limpieza del biodigestor.

Tapa hembra PVC de 4”

La tapa hembra de PVC de 4” de color blanco con rosca en el interior sirve para clausurar la conducción del niple y evitar el ingreso de otras sustancias al interior del biodigestor.

Flange de PVC de ½”

El flange PVC de ½” de color blanco nos permite la unión de las partes, del biodigestor el cual se encuentra en la parte superior del tanque. El cual se insertará desde el interior del tanque hacia el exterior para la salida del biogás.

Reductor PVC de $\frac{3}{4}$ a $\frac{1}{2}$ "

El Reductor PVC de $\frac{3}{4}$ a $\frac{1}{2}$ " de color blanco es un dispositivo que se conectará con un flange de la parte superior del tanque, y por la otra salida esta se conectará con el termómetro.

Llave de gas metálico

La llave de gas metálico de color bronceado nos sirve para cortar el paso de biogás que se generara en el interior del biodigestor por la digestión anaeróbica.

Copla PVC de 4"

La copla PVC de 4" de color blanco muy resistente a la presión estará unido con el niple de la parte inferior del tanque en uno de sus extremos esto para la salida de los residuos sólidos y limpieza del tanque.

Flange PVC de 1"

El flange PVC de 1" de color blanco se encontrará en una altura de 80 a 90 cm de altura el cual pasara a través del tanque desde el interior hacia el exterior el cual se conectará con una copla de 1" así tener una mejor sujeción y no haya escape de biol.

Agitador metálico inoxidable

El agitador metálico inoxidable estará inserto dentro del tanque de forma horizontal a una altura de 50 a 60cm el cual contará con aspás para el mezclado homogéneo de los residuos sólidos y líquidos, en la parte externa del tanque el agitador contará con una manija el cual se encontrará a una altura de 50 a 60cm sujetado por un trípode en donde descansará el agitador.

Manómetro

El manómetro es un instrumento empleado para medir la presión del fluido del biogás en el interior del biodigestor.

Termómetro para medir la temperatura de agua

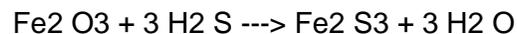
Este termómetro es un sensor que comprueba la temperatura concentrada dentro del biodigestor y de esta manera poder saber la temperatura en el cual se encuentra el proceso anaeróbico.

1.2. Diseño de filtros para la limpieza de biogás y obtención de biometano

El arreglo de limpieza y purificación se llevará a cabo en tres etapas, de modo que se garantice la limpieza del biogás o extracción de los contaminantes.

Primera etapa: Extracción de H₂S

Para la remoción del ácido sulfhídrico existen diferentes métodos como se menciona el Cuadro 20 del Marco Conceptual, entre ellos el proceso de adsorción aplicado posterior a la biodigestión mediante la utilización de óxido de hierro (hidratado) que reacciona con el H₂S presente en la corriente de biogás que sale del biodigestor. Al estar en contacto estos dos compuestos reaccionan de la siguiente manera:



De la reacción obtenemos sulfuro de hierro (III) y agua, posteriormente, poniendo en contacto el sulfuro de hierro (III) con aire producimos la siguiente reacción:

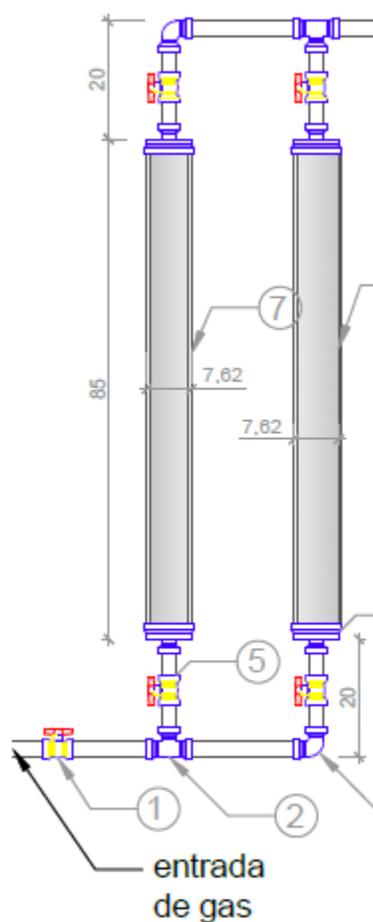


En este tratamiento el biogás pasa a través del lecho compuesto de óxidos de hierro. El H₂S se absorbe al estar en contacto con los óxidos, donde los iones Fe³⁺ se reducen a iones Fe²⁺, mientras que el H₂S se oxida a azufre elemental. Este proceso se da lugar en dos

columnas, la primera ópera eliminando el H₂S del biogás, mientras la otra está regenerando la solución ferrosa al contacto con aire (añadiendo oxígeno y agua).

Para lograr un contacto entre óxido de hierro y ácido sulfhídrico se plantea dos columnas que funciones como filtros cuyo interior contenga óxido de hierro. Estas columnas deberán estar conectadas a la corriente de biogás a la salida del biodigestor de la siguiente manera:

Figura 11. Arreglo de limpieza de H₂S.



Fuente: Elaboración propia

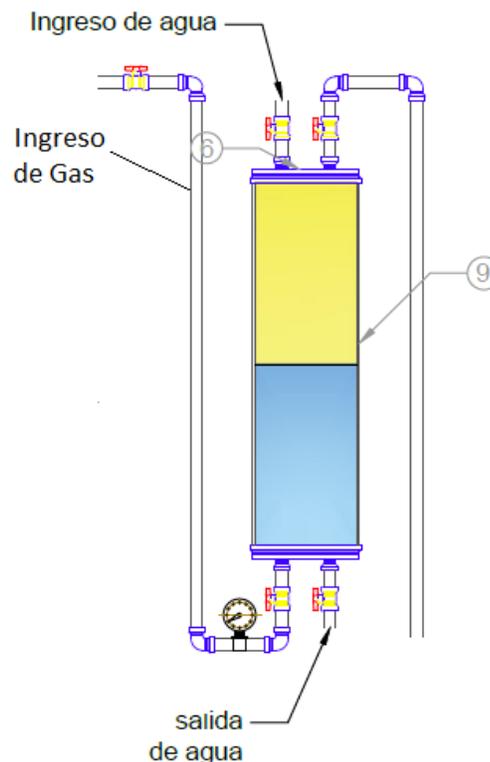
Segunda etapa: Extracción de CO₂

Las técnicas de eliminación de CO₂ con agua también favorece la eliminación de H₂S de la corriente del biogás que no se haya removido en la anterior etapa de limpieza.

La absorción física con agua se utiliza habitualmente por su efectividad y requiere poca infraestructura y es de bajo costo. Esta técnica se basa en la solubilidad que presenta el CO_2 con el agua a diferencia CH_4 que no se disuelve en agua.

El proceso de filtrado de biogás para el presente proyecto tendrá diferencias respecto al utilizado comúnmente, para este caso se provee la incorporación de una columna llena de agua cuya altura dependerá de la presión del biogás. Por la parte inferior de la columna se tendrá dos orificios de salida, una del agua saturada de CO_2 , y por el otro se suministrará el biogás que sale de la primera etapa de extracción, el biogás al momento de entrar en contacto con agua se dispersará a través de una superficie llena de orificios de manera que generen un mayor contacto gas – líquido y así mejore la absorción del CO_2 en el agua. Por la parte superior de la columna tendrá dos orificios de salida una del gas limpio de CO_2 y otro orificio de alimentación de agua.

Figura 12. Arreglo de limpieza de CO_2 .



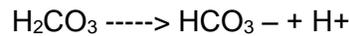
Fuente: Elaboración propia

El proceso de absorción depende de ciertos parámetros como ser la temperatura, la presión, composición de CO₂ en biogás y cantidad de agua necesaria. Estos parámetros determinan la eficiencia del proceso, a menor temperatura mayor solubilidad del CO₂ en agua, a menor presión disminuye la solubilidad y a mayor concentración de CO₂ en el biogás mayor cantidad de agua necesaria para la limpieza.

La reacción que se dará lugar en este proceso es la siguiente:



Una vez formado, el ácido carbónico se disocia parcialmente para dar bicarbonato y protones:



La solubilidad del CO₂ en el agua pura a 25 °C es de 1,45 g/L, este parámetro varía con la temperatura.

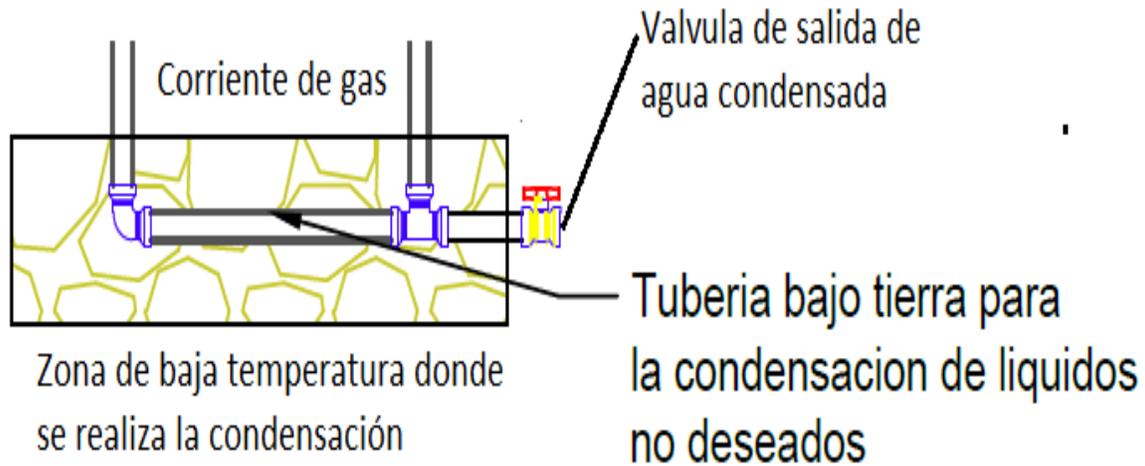
Es de esperar también que, a mayor caudal de agua, mayor sea la cantidad de dióxido de carbono disuelto. El CO₂ atrapado en agua, posteriormente puede ser liberado a la atmósfera al disminuir la presión.

Tercera etapa: Extracción de H₂O

La remoción de agua de la corriente del biogás purificado será a través de la disminución de la temperatura del flujo de manera que el agua se condense para su purga.

Con el diseño de purificación se espera que la eliminación de los contaminantes de la corriente de biogás sea efectivo transformado el biogás a biometano para usos similares al Gas Natural.

Figura 13. Diagrama de condensación.



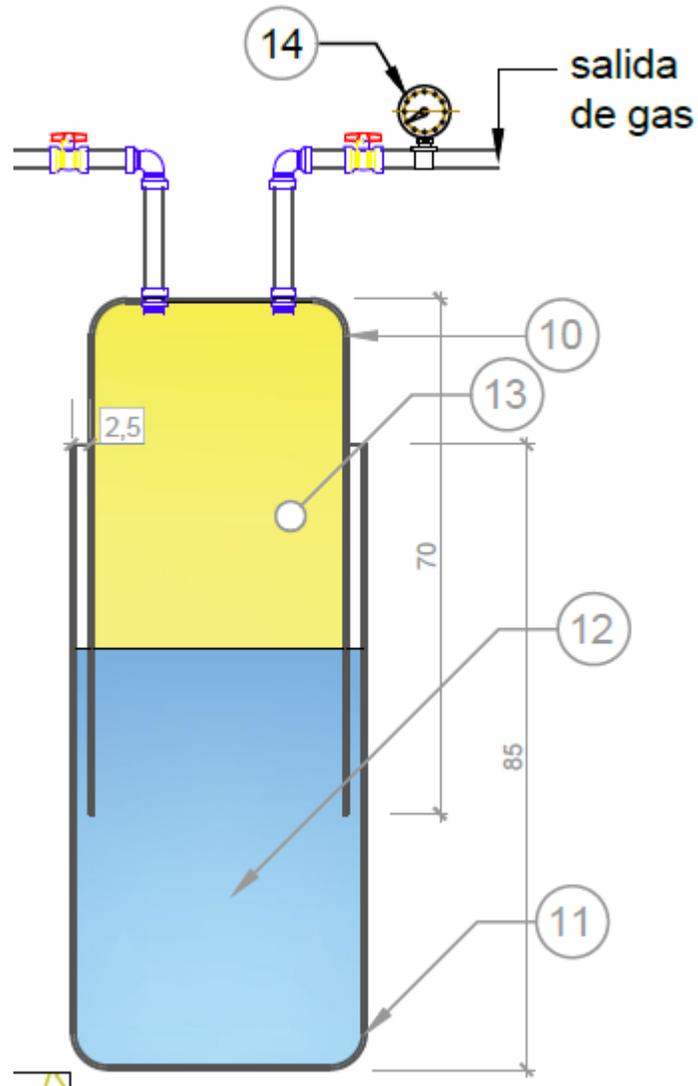
Fuente: Elaboración propia.

Acumulación de biogás:

Recordemos que este proyecto tiene la finalidad de generar energía eléctrica, por lo cual considerar un acumulador de gas es importante para suministrar un flujo controlado de gas limpio al quemador.

Las características del acumulador están dadas de la siguiente forma:

Figura 14. Diagrama del acumulador de biometano.



Fuente: Elaboración propia.

1.2.1. Descripción de los componentes para la limpieza de biogás y obtención de biometano

Cuadro 22. Materiales y componentes para el proceso de limpieza de gas.

Filtro de extracción de H₂S	Cantidad necesaria
Tubería PVC 2"	2 mts
Válvulas ¾",	6 unidades
Codos de ¾",	2 unidades
" T " de ¾",	2 unidades
Tubería de PVC de ¾"	2 mts
Reductores PVC de 2" a ¾"	4 unidades
Filtro de extracción de CO₂	
Tubería de 6",	80 cmts
Taponos de 6",	2 unidades
Válvulas ¾",	4 unidades
Codos de ¾",	5 unidades
Tubería de PVC de ¾"	3 mts
Un medidor de presión	1 unidad
Salidas de gas y agua de ¾"	4 unidades
Extracción de H₂O	
Codos de ¾",	2 unidades
" T " de ¾",	1 unidades
Válvulas ¾",	1 unidades
Tubería de PVC de ¾"	4 mts
Acumulador de biometano	
Tanque de 350 lts	1 unidad
Tanque de 200 lts	1 unidad
Salidas de gas de ¾"	2 unidades
Codos de ¾",	3 unidades
Válvulas ¾",	1 unidades
Medidor de presión manómetro	1 unidades

Todos los componentes serán preferentemente de PVC o plásticos que son inertes con la presencia del gas y no afectan ni contribuyen en el proceso, otra de las razones de utilizar este material es porque no sufren de corrosión y poseen una larga vida útil.

Cuadro 23. Componentes del proceso de filtros y limpieza

Componente	Imagen
Tubería PVC, 2" y 6"	 <p>Fuente: Recuperado de la página https://ferreteriasdevenezuela.com</p>
Tubería de gas ½ "	 <p>Fuente: Recuperado de la pagina de Mercado Libre (2021)</p>
" T " de ¾", 2 unidades	 <p>Fuente: Recuperado de la pagina de https://tuberiaspvc.pe</p>
Reductores PVC de 2" a 1/2"	

	<p>Fuente: Recuperado de la pagina https://www.amazon.com</p>  <p>Fuente: Recuperado de la pagina https://www.amazon.com</p>
<p>Salidas de gas y agua</p>	 <p>Fuente: Recuperado de la página https://anilco.com.uy</p>

Seguidamente se describirá algunos componentes del proceso limpieza de gas que no fueron rescritos anteriormente en la parte (descripción del material de construcción del biodigestor).

Tubería PVC, 2” y 6”.

Las siglas PVC significan cloruro de polivinilo y es un plástico blanco rígido que se usa en las líneas de desechos sanitarios, tuberías de ventilación con aplicaciones domésticas y comerciales. Es un tubo rígido fuerte, resistente a los químicos, que se corta y mide fácilmente.

Tubería de gas ½ ”

La tubería Pavco Wavin Gas, para la conducción de gases combustibles como gas natural y propano, es liviana, durable, flexible, resistente a la corrosión y a la degradación. Se acoplan por termofusión y electrofusión y requieren mínimo mantenimiento.

Están en diámetros de 1/2" hasta 8". están fabricadas en polietileno de media o alta densidad, poseen las siguientes características

- resistencia y durabilidad superiores
- absorción de impactos
- variedad de diámetros que se adaptan a sus requerimientos
- termofusión o electrofusión
- resistencia a agentes químicos
- ligereza: su densidad la hace ligera y flexible para una rápida y sencilla instalación
- embarcados en bobinas o tramos
- color amarillo (media densidad) o negro con franja amarilla (alta densidad)

“T” de ¾”, 2 unidades

Material PVC con sistema roscado, virgen sin estabilizante de plomo, lo cual reduce el impacto ambiental.

Reductores PVC de 2” a 1/2”

Material PVC con rosca interna con la función de reducir diámetros.

Reductor de tubo de presión a roscas de tubería hembra estándar, No se agrieta, cambia de color o se degrada con el tiempo ideal para riego y sistemas de aspersor residenciales subterráneos.

Salidas de gas y agua

El material es de PVC, utilizado para salida e ingresos a tanques, este componente es resistente y duradero en su tarea de almacenar sólidos sedimentados y permitir la descarga del líquido clarificado. Fabricado para diferentes diámetros.

1.2.2. Ponderación de resultados

Después de un análisis considerando una **capacidad de fermentación de 450 kg** de Residuos Orgánicos Domésticos (ROD) se obtendrá un total de **223, 6 m3 de biogás**, este

gas pasado el proceso de filtrado y purificación (proceso para aumentar la concentración de metano en la corriente de gas), se tendrá un total de **129 m³ de gas (biometano)**.

El biogás obtenido después del proceso de biodigestión y antes del proceso de filtrado y purificación tendría las concentraciones como lo muestra la tercera columna del cuadro, Cantidad de gas obtenido (ponderada). El detalle de los cálculos realizados para la ponderación de resultados se encuentra en los Anexos.

Cuadro 24. Ponderación sobre la concentración de gases en el biogás obtenido

Componente	Porcentaje o valor asumido para la ponderación	Cantidad de gas obtenido (ponderada)
CH ₄	55 %	123 m ³ de CH ₄
CO ₂	36 %	80 m ³ de CO ₂
H ₂ S (ppm)	500 ppm	111800 ppm de H ₂ S
N ₂	5 %	11,18 m ³ de N ₂
O ₂	1%	2.24 m ³ de O ₂
Compuestos halogenados (mg/m ³)	600 ppm	215 m ₃ mg/m ³

Fuente: Elaboración propia

1.3. Diseño de la Turbina o Motor a Combustión y el Alternador para la Generación de Energía Eléctrica

En el proceso de producción de energía eléctrica mediante gas natural o biogás (el principio de funcionamiento es el mismo), existen varias tecnologías para la aplicación; la diferencia de aplicar una u otra tecnología radica especialmente en la cantidad de combustible con el cual se va a operar el sistema de generación, la eficiencia, las potencias máximas y mínimas de generación, el costo del equipo e instalación, etc.

1.3.1. Consideraciones respecto al sistema elegido para la generación de energía eléctrica

En el contexto de lo mencionado en el párrafo anterior, se han examinado determinadas características específicas de las micro turbinas respecto a los motores a combustión y se han obtenido los siguientes puntos comparativos:

- (a) Micro-turbinas:** En los últimos años, las turbinas a gas se han convertido en la tecnología más difundida para la generación a gran escala y también son utilizadas en generación a pequeña escala y, en consecuencia, en el mercado hay disponibles unidades de pocos kilovatios efectivos (kW-e) de potencia hasta unos centenares de KW-e. En comparación con los motores de combustión interna se puede decir que el espacio que utilizan las micro turbinas es menor que los motores convencionales, tienen una baja emisión de óxidos de nitrógeno (NOx) a la atmósfera y en poco tiempo alcanzan su potencia nominal o plena carga. Sin embargo, la eficiencia energética eléctricas son típicamente inferiores y el costo de instalación es muy superior al de los motores de combustión interna. En la tabla de la siguiente página se presentan las características principales de micro turbinas, operando en ciclo simple, como: capacidad eléctrica nominal (kW), consumo energético (Btu/kWh), eficiencia energética eléctrica (%), entrada de combustible (MMBtu/hr), presión requerida del gas (psig) y el costo del kilovatio instalado (\$USD/kW). Como se puede observar, todas las características antes mencionadas varían según la capacidad eléctrica nominal (kW-e) de micro turbinas. Resulta sumamente pertinente aclarar que en la tabla se presentan las características principales para diferentes fabricantes a nivel mundial.

Cuadro 25. Características principales de micro turbinas, operando en ciclo simple.

<i>Características de rendimiento</i>	Capstone modelo 330-30kW	IR Energy System 70LM*-70kW	Turbec T100-100kW	DTE** -350kW
<i>Capacidad de Electricidad Nominal (kW)</i>	30kW	70kW	100kW	350kW
<i>Heat Rate eléctrica (Btu/kWh)</i>	14,581	13,54	12,637	11,766
<i>Eficiencia Eléctrica (%)</i>	23,4%	25,2%	27,0%	29,0%
<i>Entrada de Combustible (MMBtu/hr)</i>	0,437	0,948	1,264	4,118
<i>Presión de gas, Combustible requerido (psig)</i>	55	55	75	135
<i>Costo total instalado \$USD/kw</i>	1962	1729	1320	1171

Fuente: Tecnologías de generación distribuida: Costos y eficiencia, Francisco M. González - Longatt, 2004

(b) Motores de combustión interna En cuanto a este sistema de generación de energía eléctrica, se debe anotar que la mayoría de las unidades utilizadas para la generación (ciclo simple) y cogeneración (ciclo combinado) a pequeña escala, son motores de combustión interna que funcionan con los mismos principios que sus equivalentes de vehículos de gasolina y diésel. Los motores funcionan con combustibles líquidos o gaseosos, como: el gasóleo, gas natural o biogás. En la actualidad se fabrican desde un rango de potencia que van desde las decenas de Kw hasta 20 MW o más.

Los motores de combustión interna tienen eficiencias eléctricas que varían entre un 30 y 39% (ver el cuadro 27), se caracterizan por ser máquinas de 4 tiempos que operan en ciclo Otto. En la citada tabla, se presentan también las características de motores de combustión de diferentes fabricantes a nivel mundial.

Cuadro 26. Características principales de los motores de combustión interna cuando operan en ciclo simple.

Características de rendimiento	MAN 100kW-150kW	Cummis GSK19G 300kW	Caterpillar G3516LE 800kW	Caterpillar G3616LE 3000kW	Wartsila 5238LMN 5000kW
<i>Capacidad de Electricidad Nominal (kW)</i>	100kW	300kW	800kW	3000kW	5000kW
<i>Heat Rate eléctrica (Btu/kWh)</i>	11147	10967	10246	9492	8758
<i>Eficiencia Eléctrica (%)</i>	30,6%	31.1%	33.3%	36,0%	39,0%
<i>Entrada de Combustible (MMBtu/hr)</i>	1,11	3,29	8,2	28,48	43,79
<i>Presión de gas, Combustible requerido (psig)</i>	<3	<3	<3	43	65
<i>Costo total instalado \$USD/kw</i>	1515	1200	1000	920	920

Fuente: Tecnologías de generación distribuida: Costos y eficiencia, Francisco M. González - Longatt, 2004

Para determinar la tecnología más adecuada para el presente proyecto, se ha visto conveniente realizar un listado de parámetros que permitan comparar los equipos de combustión y tomar una óptima decisión. Dicho listado está conformado por opciones y criterios; los criterios que se consideraron son los siguientes:

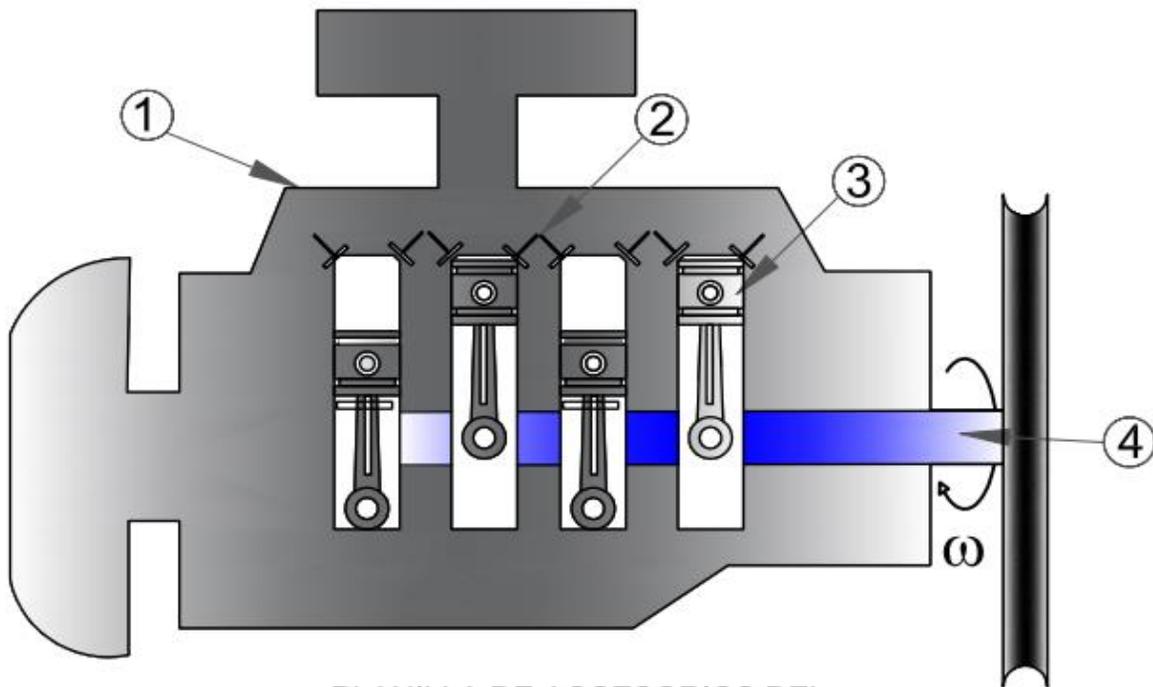
1. Eficiencia energética eléctrica
2. Costo del kW instalado
3. Costo de mantenimiento
4. Grado de contaminación
5. Consumo de combustible

Como consecuencia de las tablas presentadas, las consideraciones que se pueden colegir de dichas tablas y además, tomando en cuenta estrictas razones de seguridad industrial específicas para el presente trabajo de investigación, los espacios en los que se pretende implementar los biodigestores y con el objetivo principal de evitar accidentes por fuego, se

ha resuelto dejar de lado la micro turbina o turbina a vapor ya que para la generación del indicado vapor se requiere combustionar el biogás con el propósito específico de producir fuego y a partir de éste elemento hervir agua. Todo ello requiere el cumplimiento de estrictas normas de prevención contra incendios, ambientes con mucha accesibilidad tanto de entrada como de salida (normas de seguridad) sistemas de extinción y también de personal a cargo de la operación de la turbina; es decir de operadores que trabajen en diferentes turnos y que estén permanente controlando y monitoreando todo el proceso ya que la producción de vapor demanda de elevadas temperaturas (fuego intenso) en un quemador, un caldero y además un sistema completo de refrigeración para reciclar el agua hervida que después de generar energía cinética rotacional en la turbina puede recircular y por ende ser reutilizada.

Bajo tales consideraciones y además por razones de no elevar excesivamente los costos, la mejora de la eficiencia energética del sistema de generación eléctrica, se ha estimado mucho más óptima la implementación de un sistema MOTOR–ALTERNADOR conformado por un motor a combustión Ciclo OTTO (referencia: figura 5, pg. 52) y un alternador de 2 pares de polos (referencia: figura 8, pg. 54) y finalmente el sistema motor generador cuyos diagramas esquemáticos, específicos para el caso (corte longitudinal), se muestran a continuación:

Figura 15. Detalle constructivo del motor a combustión interna (ciclo otto).

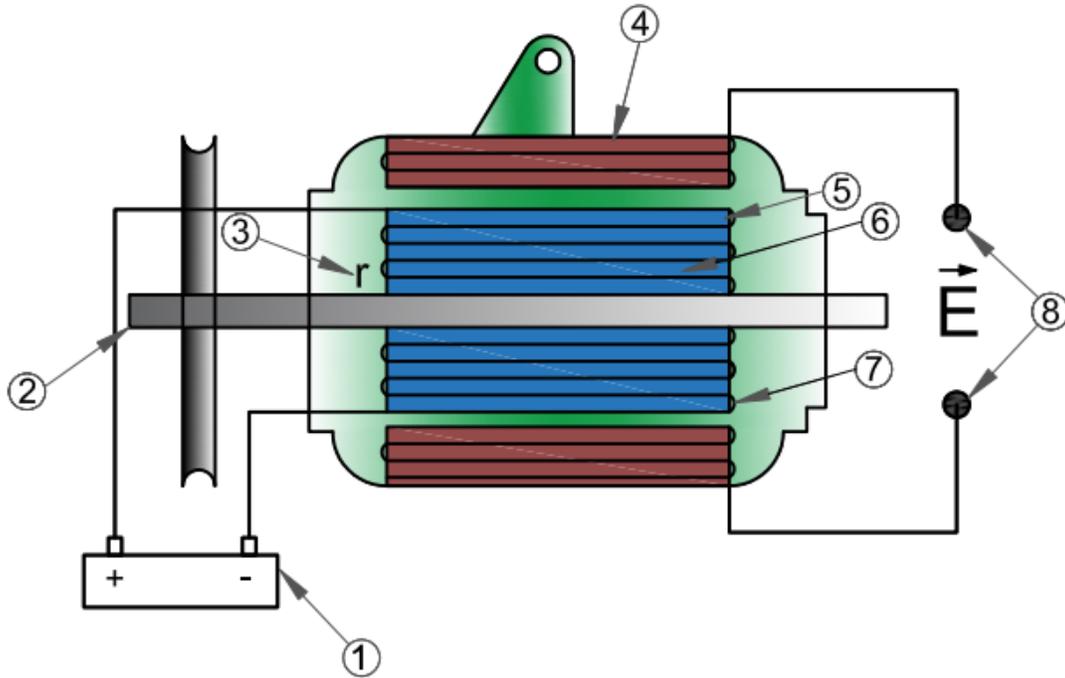


PLANILLA DE ACCESORIOS DEL
MOTOR A COMBUSTIÓN INTERNA

REF	DETALLE
1	CULATA DEL MOTOR
2	EMBOLOS
3	PISTONES
4	ω =VELOCIDAD ANGULAR (RPM) TRANSFERIDA AL ALTERNADOR

Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Detalle constructivo del alternador.



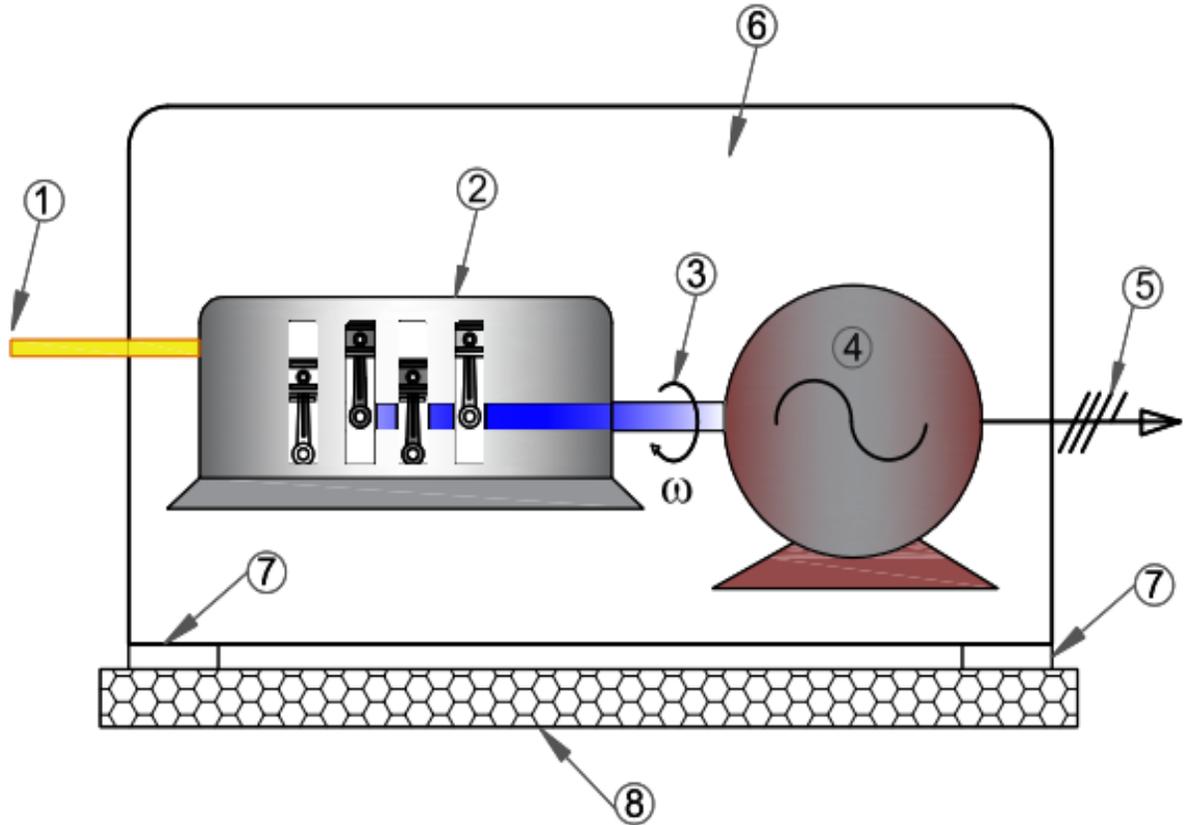
PLANILLA DE ACCESORIOS
 ALTERNADOR (GENERADOR C.A.)

REF	DETALLE
1	FUENTE DE EXCITACIÓN (24V C.C.)
2	ω =VELOCIDAD ANGULAR DEL ROTOR (1500 RPM)
3	r = RADIO DEL ROTOR (m)
4	ESTATOR

REF	DETALLE
5	ROTOR
6	NUCLEO FERROMAGNETICO
7	BOBINADO DE EXCITACIÓN
8	E = TENSIÓN EN BORNES DEL ALTERNADOR (V)

Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Sistema de generación de electricidad.



PLANILLA DE ACCESORIOS DEL MOTOR - ALTERNADOR

REF	DETALLE
1	INGRESO BIOGAS CH ₄ (TUBERIA PVC 2")
2	MOTOR A COMBUSTIÓN CH ₄
3	VELOCIDAD ANGULAR (RPM)
4	ALTERNADOR ELÉCTRICO

REF	DETALLE
5	SALIDA CONDUCTOR DE ALAMBRE AISLADO (3 φ, 50Hz, 220 / 380 V C.A.)
6	CAMARA DE INSONORIZACIÓN
7	AISLADORES DE VIBRACIÓN
8	ESTRUCTURA DE MONTAJE

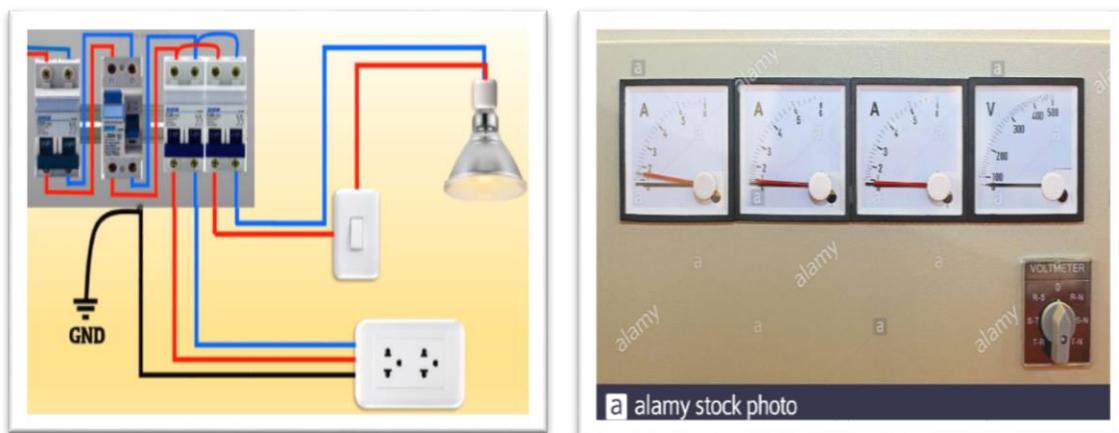
Fuente: Elaboración propia

1.3.2. Descripción de los equipos y materiales componentes del generador de energía eléctrica

Cuadro 27. Equipos y materiales del generador de energía eléctrica

1. Motor a Combustión accionado por Biogás CH ₄ .
2. Alternador TRIFASICO 5 KVA. 2230/400 V, 50 Hz. Stand By.
3. Tablero de Control y Protección con
1 Voltímetro (0-600V)
1 Amperímetro (0-25A),
1 Watímetro (0-5 kW) A objeto de un dotar al equipo de un buen sistema de control se incluyen
1 Frecuencímetro (0-55Hz)
1 Cosfímetro o medidor del factor de potencia
Interruptor Principal de Protección de 25 A.
4. Aisladores de Vibración. (cantidad 6)
5. Cabina de Insonorización de 25dB
6. Accesorios para el montaje. (pernos de anclaje, etc.)
7. Obras Civiles necesarias para la construcción de la plataforma de soporte de todo el sistema.
8. Mano de Obra para el Montaje y puesta en marcha del sistema.

Figura 18. Tableros eléctricos de control protección y medición



Fuente: Manual de tableros eléctricos NB 777

2. Costos

A continuación se describe el costo de los componentes para el biodigestor hasta el sistema (Motor – Alternador) para la generación de energía eléctrica

Cuadro 28. Detalle de costos para el biodigestor

MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO Bs.	TOTAL Bs.
Tanque Campeon de 900Ltr.	Pza.	1	680	680,00
Agitador	Global	1	551	551,00
Niple de 4" PVC	Pza.	2	40	80,00
Copla de 4" PVC	Pza.	1	40	40,00
Tapa de 4" hembra PVC	Pza.	1	45	45,00
Llave de paso de 4" PVC	Pza.	1	250	250,00
Codos de 1" PVC	Pza.	1	5	5,00
Llave de gas codo hembra	Pza.	1	38	38,00
Reductor de 3/4 a 1/2	Pza.	1	5	5,00
Flange de 1/2"	Pza.	1	15	15,00
Flange de 1"	Pza.	1	15	15,00
Teflon 3/4 rojo	Pza.	3	3	9,00
Llave de paso de 1" PVC	Pza.	1	27	27,00
Sella rosca	Pza.	1	16	16,00
Tarrajá	Pza.	1	50	50,00
Tubo PVC de 1"	Pza.	1	15	15,00
Poxipol	Pza.	1	15	15,00
Manómetro de presión	Pza.	1	0	-
Termómetro de medidor de temperatura de agua	Pza.	1	160	160,00
Goma 50cm*50cm	Pza.	1	25	25,00
Callapos	Pza.	2	20	40,00
Combustible	Litros	3	100	300,00
TOTAL Bs.				2.381

Cuadro 29. Detalle de costos para filtros de purificación

FILTRO DE EXTRACCIÓN de H ₂ S	CANTIDAD	COSTO UNITARIO Bs.	Total Bs.
Tubería PVC 2"	2 mts	40	80
Válvulas ½ "	6 unidades	35	210
Codos de ½ "	2 unidades	2	4
" T " de ½ "	2 unidades	3	6
Tubería de gas de ½ "	2 mts	25	50
Reductores PVC de 2" a ½ "	4 unidades	25	100
Filtro de extracción de CO₂			
Tubería de 6",	80 cmts	80	80
Tapones de 6",	2 unidades	25	50
Válvulas ½ "	4 unidades	35	140
Codos de ½ "	5 unidades	2	10
Tubería de PVC de ½ "	3 mts	25	75
Un medidor de presión	1 unidad	150	150
Salidas de gas y agua de ½ "	4 unidades	15	60
Extracción de H₂O			
Codos de ½ "	2 unidades	2	4
" T " de ½ "	1 unidades	2	2
Válvulas ½ "	1 unidades	35	35
Tubería de gas de ½ "	4 mts	25	100
Acumulador de biometano			
Tanque de 350 lts	1 unidad	350	350
Tanque de 200 lts	1 unidad	250	250
Salidas de gas de ½ "	2 unidades	15	30
Codos de ½ "	3 unidades	2	6
Válvulas ½ "	1 unidades	35	35
Medidor de presión manómetro	1 unidades	150	150
Pasta par PVC	1 unidades	15	15

Teflón	5 unidades	3	15
Abrazaderas	25 unidades	2	50
TOTAL COSTO			2.059

Cuadro 30. Detalle de costos para generación de electricidad

EQUIPO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO Bs.	COSTO TOTAL Bs.
Sistema De Generación De Energía Eléctrica con todos los accesorios y obras civiles ya mencionados	Global	1	57.825	57.825
TOTAL Bs.				57.825

Cuadro 31. Resumen de Costos.

COMPONENTES	COSTO TOTAL Bs.
Biodigestor	2.381,00
Filtros de Purificación	2.059,00
Sistema De Generación De Energía Eléctrica	57.825,00
TOTAL Bs.	62.265,00

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

El diseño del biodigestor se elaboró de acuerdo a las experiencias primarias y secundarias, también se consideró la facilidad y accesibilidad de construcción para que dicho proyecto pueda ser adoptado por cualquiera institución pública o privada, además el tipo de biodigestor que se diseñó (vertical) está orientado para transformar los desechos vegetales de domicilios urbanos, de esta manera promover que los habitantes de áreas urbanas tengan la oportunidad de monetizar los desechos como ingreso adicional de recursos, y por otro lado al monetizar los desechos vegetales los habitantes estarán capacitados en manejo de residuos vegetales, de esa manera contar con una ciudad limpia libre de contaminantes.

El modelo del diseño del biodigestor elaborado, puede ser magnificado a nivel semiindustrial e industrial, lo que puede ser una buena alternativa para generar ingresos, empleos, limpieza urbana, sobre todo evitar contaminación ambiental, además producir bioabonos para agricultura orgánica, como biocombustible para cocina y generar energía eléctrica para las zonas que no cuentan con energía eléctrica, de esta manera ayudar a las familias necesitadas.

El diseño de los filtros se ha propuesto con la finalidad de retirar las impurezas de la corriente de biogás y considerando el acceso a los insumos necesarios para dicho fin, con el diseño presentado en el Capítulo de Resultados aseguramos que el gas aguas arriba del arreglo de filtros será biometano, con una concentración superior al 90% de metano. El diseño consiste en retirar en primera instancia el ácido sulfhídrico con hidróxido de hierro, luego a través de un filtro a base de agua retira el dióxido de carbono y posteriormente enfriar la corriente, y por condensación retirar el agua. El arreglo de filtros considerando solo materiales tiene un costo de 2059 bs, mismo que garantiza la remoción de los contaminantes de la corriente de biogás.

Las consideraciones para el diseño del Sistema Eléctrico de Generación (Motor a Combustión CH₄– Alternador) presentan las mejores condiciones técnicas y operativas del caso; empero se desconoce a plenitud los porcentajes de los componentes químicos del Biogás y tampoco la capacidad térmica de dicho combustible; esto podría afectar el óptimo rendimiento del sistema de generación, aunque se asume como válidos los datos de concentración y de remoción de contaminantes.

CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA

Almeida, A., Nafarrate, E., Alvarado, A., Cervantes, A., Luevanos,. Oropeza, R. & Balagurusamy, N. (2011). Expresión genética en la digestión anaerobia: un paso adelante en la comprensión de las interacciones tróficas de esta biotecnología. Universidad Autónoma de Coahuila. 81p.

Aparcana, S. (2005). Aprovechamiento energético de los residuos de un matadero frigorífico industrial y la biomasa regional en Arequipa, Perú bajo la aplicación de la gestión de flujos de materiales y energía. Universität Trier . Alemania. 128p.

Aparcana, R. (2008). Estudio sobre valor fertilizante de los productos del “Proceso anaeróbico” para producción de biogás. 101p. Arrieta, W. 2016. Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado. Universidad de Piura. Piura, Perú. p. 231.

Arrieta, W. (2016). Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol del ganado. Universidad Piura. Perú. p. 231.

Barrantes, R. (2002). Investigación: Un camino al conocimiento, un enfoque cualitativo y cuantitativo. Ed. Universidad Estatal a Distancia, San José. Costa Rica. p. 243.

Biomasa. (2011). Digestores anaerobios. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía. p. 42.

Bote, P. (2013). Estudio de los efectos del pH extremo por adición de NaOH sobre la producción y calidad del biogás y otros parámetros de la digestión anaerobia urbana. Instituto Universitario del agua y de las Ciencias Ambientales. España. 91p.

Cabos, J., Bardales, C., León, C. & Gil, L. (2019). Evaluación de las concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio del biol y biosol obtenidos a partir de estiércol de ganado vacuno en un biodigestor de geomembrana de policloruro de vinilo. Universidad Privada Antenor Orrego. Trujillo, Perú. 1176 p.

Campero, O. (2009). Biogás en Bolivia programa “viviendas auto energéticas”. Tecnologías en desarrollo. Bolivia. 8p.

Campos, A. (2001). Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria. Universidad de Lleida. Lleida, España. 394p.

- Castillo, I. (2010). Evaluación de la Factibilidad Técnica de la implementación de biodigestores en Venezuela. Universidad Bolivariana. Caracas, Venezuela. 74 p.
- Carrillo, L. 2003. Microbiología Agrícola. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta. Salta, Argentina. 146 p.
- CEDECAP. (2007). Biodigestor de Polietileno: Construcción y Diseño. Argentina. p. 15.
- Colque, T., Mujica, A. & Apaza, V. (2005). Producción de Biol y abono líquido Natural y Ecológico. Puno, Illpa, Perú. p. 14.
- Chen. Y., Cheng, J., & Creamer, K. (2007). Inhibición del proceso de digestión anaeróbica. Universidad del estado de Carolina del Norte 28p.
- Colque, T., Mujica, A. & Apaza, V. (2005). Producción de Biol y abono líquido Natural y Ecológico. Puno, Illpa, Perú. 14 p.
- Cuesta, M., Martín, F., Vicente, G. & Villar, S. (2009). Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento. Informe de vigilancia técnica. Madrid, España. p. 111.
- Díaz, A. (2013). Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya. (Bolivia). Barcelona TECH. p. 89.
- Deutsche, G. (2012). Guide to biogas, from production to use. Alemania.86p.
- Elías, X., Campos, E., & Flotats, X. (2012). Procesos biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje. Madrid, España. p. 684.
- Fernández, J. (2010). Optimización de la digestión anaeróbica seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura. Universidad de Cádiz. España. 86p.
- García, K. (2009). Codigestión Anaeróbica De Estiércol Y Lodos De Depuradora Para Producción De Biogás. Universidad de Cádiz. Cádiz, España. 70p.
- García, V. (2011) MANUAL DE BIOGÁS. Buenos Aires. p. 46.
- García, A. & Gómez, J. (2016). Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia. Fundación Universidad de América. Bogotá. 120p.

Gonzabay, A. & Suarez, P. (2016). Diseño y construcción de un biodigestor anaeróbico vertical semicontinuo para la obtención de gas metano y biol a partir de las cáscaras de naranja y mango. Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador. Guayaquil, Ecuador. 84p.

Guevara, A. (1996). Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales: producción de gas y saneamiento de efluentes. Lima, Perú. 77p.

Hernández, H. (2005). Tratamiento de lactosuero hidrolizado por medio de un reactor UASB. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Tulancingo. 85p.

Hilbert, J. (2006). Manual para la producción de biogás. Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. 57 p.

Hilbert, J. (2007). Manual para la producción de biogás. Instituto de Ingeniería rural. México DF. p. 54.

INE. (2017). Residuos sólidos en ciudades capitales y el alto llegó a más de un millón de toneladas. Instituto Nacional de Estadísticas. La Paz Bolivia.

Insam, H., Franke-Wittle, I. & Goberna, M. (2009). Microbes in aerobic and anaerobic waste treatment. London, New York. 34p.

Informe De Sostenibilidad - Banco Interamericano de Desarrollo 2017

Integrated Resource Plan - PacifiCorp IRP Resource Planning 2017 www.pacificorp.com

Jiménez Rivera, Hortensia: La Nacionalización del Sector Eléctrico en Bolivia. Editorial Centro de Investigaciones Sociales (CIS) 2018

La Infraestructura en el Desarrollo Integral de América Latina. IDeAL – CAF 2013

La Red del Futuro, Desarrollo de una red eléctrica limpia y sostenible para América Latina - BID 2017

León, C., Norberto, C., & Mendoza, G. 2019. Diseño e implementación de una planta piloto de producción de Biogás, Biol y Biosol.

Levelized Cost of Energy (LCOE) U.S. Department Of Energy - 2017

López, D. (2008). Manejo y tratamiento adecuado de desechos sólidos de Santa Rosa de Copán. Universidad Nacional Autónoma de Honduras. Honduras. 87p.

Mamani P., Chávez E., Ortuño N. El Biol. Unidad de Comunicación PROINPA. p. 11.

Manual de Planificación Energética - OLADE 2017

Massi, E. (2012). Anaerobic Digestion. 62p.

Merced, D. (2012). Evaluación de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo continuo. Universidad Veracruzana. 62p.

Narváez, Y. Saltos, A. (2007). Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor tipo piloto para la obtención de biogás y bioabono a partir de la mezcla de estiércol vacuno y suero de queso. Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador. p. 144

Nuevo enfoque de la Integración Energética Regional – Comisión de la Integración Energética Regional CIER 2014

Núñez, O. 2015. Diseño y construcción de un Biodigestor para la generación de biogás y fertilizante orgánico. Universidad de Guantánamo. Guantánamo, Cuba. p. 42.

Nursen, O. & Coautores. (2004). Ammonia and pH Inhibition in Anaerobic Treatment of Wastewaters. 62p.

Olaya, Y. & Gonzales, L. (2009). Fundamentos para el diseño de biodigestores. Universidad Nacional de Colombia. Palmira: UNAL Editorial. p. 31.

Sarabia, O., Sánchez, A. & Rodas, Y. (2018). Generación de biogás mediante el proceso de biodigestión anaerobia a partir de aprovechamiento de sustratos orgánicos (pasto y aserrín), en la ciudad de Estelí. Managua, Nicaragua. 70p.

Soria, M., Ferrera, R., Cerrato, J., Etchevers, G., Alcántara, J., Trinidad, L., & Borges, G. (2001). Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. Terra. p. 362.

Patrick, A., Topper, R., Graves, R. & Thomas, R. (2006). The Fate of Nutrients and Pathogens During Anaerobic Digestion of Dairy Manure.

Pérez, J. (2010). Estudio y Diseño de un Biodigestor para Aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. universidad de Chile. Santiago-Chile. 71p.

Pimienta, P. J. (2012). Metodologías de la Investigación. Instituto Superior Pedagógico de La Habana, Cuba Universidad Anáhuac, México. p. 167

PLAN DE DESARROLLO ECONÓMICO Y SOCIAL En el Marco del Desarrollo Integral Para VIVIR BIEN 2016 - 2020

PLAN DE DESARROLLO ENERGÉTICO Análisis de Escenarios: 2008-2027

PLAN DE UNIVERSALIZACIÓN BOLIVIA CON ENERGÍA 2010-2025

Plan Eléctrico del Estado Plurinacional de Bolivia 2025

Plan Óptimo de Expansión del SIN 2012 – 2022

Política de Energías Alternativas para el Sector Eléctrico Estado Plurinacional De Bolivia - 2011

Renewable Energy Planning: Multiparametric Cost Optimization – National Renewable Energy Laboratory 2008

Renewables Global Status Report (GSR) - Renewable Energy Policy Network 21 Century. 2017

Revista CIER N°74- Edición Especial dedicada a la a Integración Energética Y Generación Distribuida 2017

Rittmann, B. McCarty, P. (2001). Biotecnología Ambiental: Principios Y Aplicaciones. Segunda Ed. 656p.

Rong, C. (2006). Producción mejorada de metano a partir de la digestión anaeróbica de lodos en exceso desintegrados y desproteinizados. 538p.

Sistemas de Gestión de Eficiencia Energética ISO 50001 - 2011

Téllez, C. (2008). Diseño y selección para una planta de biogás. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. p. 74.

The Clean Energy Country Competitiveness Index. CLIMATESCOPE 2017 - Bloomberg New Energy Finance

Toruño, L., Casco, D., & Lira, E. (2016). Estudio de producción de biogás por medio del proceso de digestión anaerobia no controlada a partir de diversos sustratos orgánicos en la Facultad Regional Multidisciplinaria. 27p.

Vargas, F. (2014). Plantas Medicinales, una alternativa para la agricultura familiar. Asunción, Paraguay. p. 23.

Vargas, F. (2014). Plantas Medicinales, una alternativa para la agricultura familiar. Asunción, Paraguay. 23p.

Varnero, M. (2011). Manual de biogás. Ministerio de Energía. Santiago, Chile. p. 119.

Wang, J. & Coautores. (2011). Advances in Biogas Technology. 62p.

“DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOABONOS, GAS METANO (CH₄) Y APROVECHAMIENTO EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

Yadvika, S., Sreekrishnan, T., Sangeeta, K. & Vineet, R. (2004). Mejora de la producción de biogás a partir de sustratos sólidos utilizando diferentes técnicas. Centro de tecnología y desarrollo rural. India 10p.

Zea, J., Bernal, J. & Carvajal, D. 2015. biodigestores de escala a 50 litros, una solución para la producción de gas, abono y aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos. Corporación Universitaria minuto de Dios. Soacha. p. 25.

Comisión Economía para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2019). Evaluación e implementación de proyectos piloto de biodigestores en El Salvador. Ciudad de México.: LC/MEX/TS.2019/26.

García, M. A. (2010). Diseño y evaluación de un sistema para la purificación del metano producido mediante biodigestión en el ITCR. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela de Biología .

Morero, B. (2014). Purificación de biogás con tecnologías de producción limpia . Argentina : universidad Nacional de Litoral - Facultad de Ingeniería Química.

Nie, H., Jiang, H., Chong, D., Wu,, Q., Xu, C., & Zhou, H. (2013). Comparison of Water Scrubbing and Propylene Carbonate [Comparación del lavado con agua y la absorción de carbonato de propileno para el proceso de mejora del biogás]. Energy & Fuels, 3239 –3245. doi:<https://doi.org/10.1021/ef400233w>

Rivas Solano, O., Faith Vargas, M., & Guillén Watson, R. (2010). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. Tecnologías en Marcha, pp. 39 - 46.

Rivas Solano, O., Faith Vargas,, M., & Guillén Watson,, R. (2009). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. Tecnología en Marcha, pp. 39 - 46.

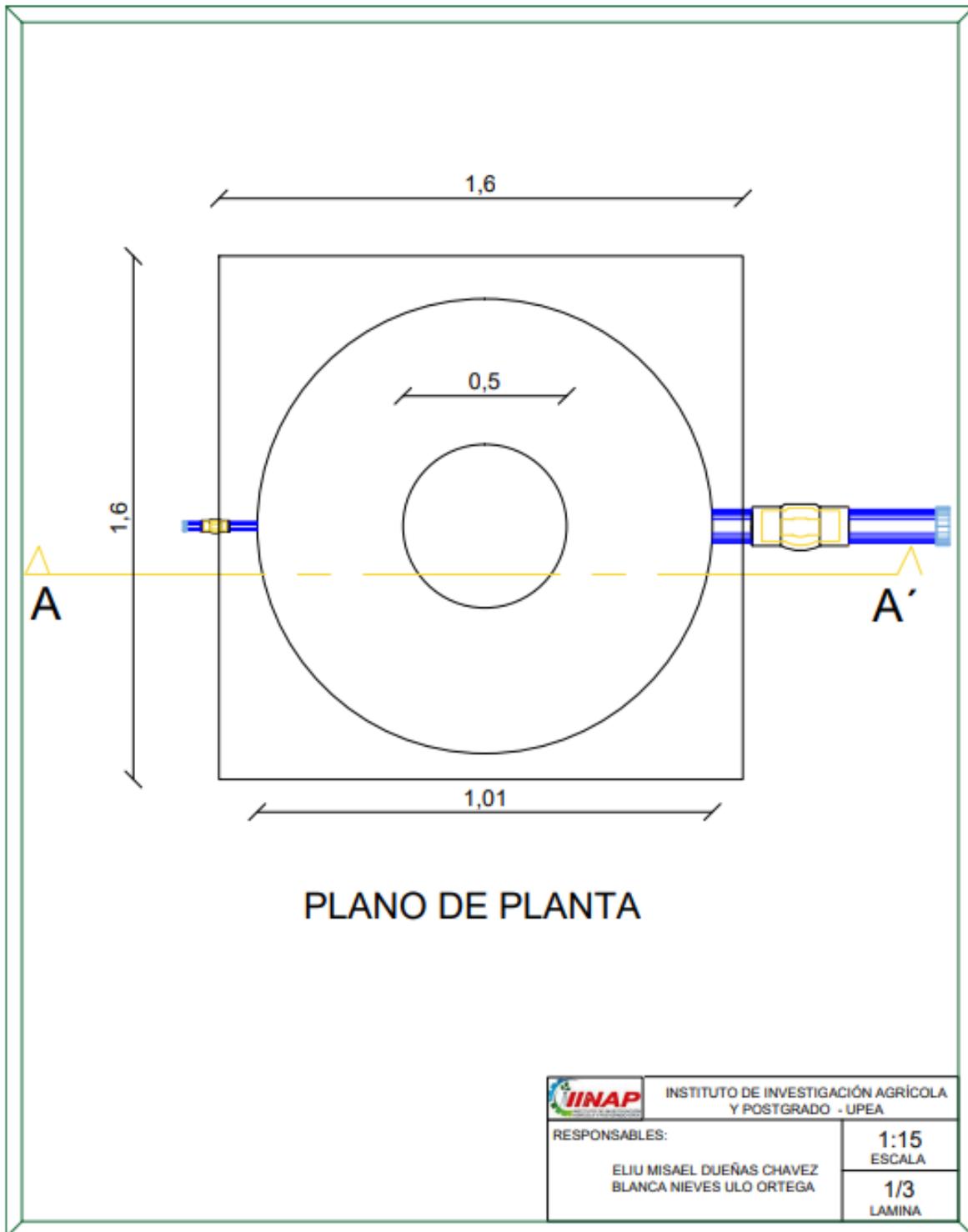
Roslan, N., Tomonori, K., & Noriatsu, O. (12 de 2018). Biogas purification performance of new water scrubber packed with sponge carriers. Journal of Cleaner Production. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.209>

Strevett, K., Vieth, R., & Grass0, D. (1995). Chemo-autotrophic biogas purification for methane enrichment:. EL SEVIER - THE BIOCHEMICAL ENGINEERING JOURNAL, pp. 71 - 79.

Strevett, K., Vieth, R., & Grass0, D. (1995). Chemo-autotrophic biogas purification for methane enrichment: mechanism and kinetics [Purificación de biogás quimio-autótrofo para el enriquecimiento de metano: mecanismo y cinética]. The Biochemical Engineering Journal, pp. 61 - 79.

Varnero, M. T., Caru, M., Galleguillos, K., & Achondo , P. (2012). Tecnologías disponibles para la purificación de Biogás usado en la generación de Electricidad. Información Tecnológica, 23(2). doi:10.4067/S0718-07642012000200005

ANEXOS



“DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOABONOS, GAS METANO (CH₄) Y APROVECHAMIENTO EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

