

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR.
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
CARLOS RAFAEL RODRIGUÉZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA



TÍTULO:

**Diseño de un Biodigestor utilizando los residuos albañales del Hotel Pasacaballos
Provincia Cienfuegos.**

**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

Por

AUTOR: Isidro José Simba Pascoal

TUTOR(ES): Dr. Enrique Arturo Padrón Padrón

AÑO (62) DE LA REVOLUCIÓN.

CIENFUEGOS 2020.

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS



Sistema de Documentación y Proyecto.

Hago constar que el presente trabajo constituye la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Cienfuegos, autorizando a que el mismo sea utilizado por el Centro de Estudio Superior para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de dicha institución.

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico Técnico

Nombre y Apellidos. Firma.

Vice Decano.

Firma del Tutor

Nombre y Apellidos. Firma.

Sistema de Documentación y Proyecto.

Nombre y Apellido. Firma.

Pensamiento.

Cuando el mundo estuviere unido en búsqueda del conocimiento, y no pelear más por dinero y poder, entonces nuestra sociedad podrá por fin evolucionar a un nuevo nivel.

Extraído del libro "Um Estranho em Goa"

José Eduardo Agualusa.

Agradecimiento.

Mi profundo y excelso gratitud va direccionado al Dador de la vida el gran Criador y eterno Dios en nombre de su hijo Jesucristo, por su constante amor, misericordia, paz y privilegio de haberme permitido estudiar en Cuba, de igual modo, conocer personas que marcaron en realidad mi vida y mis estudios.

A la institución universitaria de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez” que me enseñó durante toda mi formación en Cuba, quiero expresar mi sincera gratitud, a todos los profesores desde que llegué sin saber hablar ninguna palabra en español hasta que termino en este momento como aspirante profesional a la ingeniería mecánica, solo digo muchas gracias; porque me ayudaron en la concreción de la misión de la cual vine en este bendito suelo caribeño llamado Cuba.

A mi querido tutor, Dr. Enrique Arturo Padrón Padrón por su dedicación, amabilidad motivación en la realización de esta tesis; a quien con sus ideas pudieron hacer realidad este trabajo. A mis compañeros angolanos, que juntos formamos un gran equipo desde que llegamos, y hoy podemos decir hasta aquí nos ayudó Dios, a los hermanos de la primera iglesia Bautista de Cienfuegos; a mis amigos en Angola, sin olvidar un especial agradecimiento a la dirección de las relaciones internacionales de la Universidad de Cienfuegos en la persona de la Lic. Lázara Pérez Clemente “mami Lachy”.

Muchas gracias a todas las personas que contribuyeron de forma directa o indirecta en el desarrollo de mi vida como estudiante.

Dedicatoria.

Primeramente, a Dios que me permitió llegar hasta aquí; a mis padres, José Pascoal y Antonieta Simba, quienes en este momento estarían orgullosos de verme formado y mirar de igual manera, sus sonrisas radiantes hacia mi; que Dios eterno los tenga. A mi hermano mayor que partió de igual manera que ellos.

A todos mis hermanos y hermanas que me apoyaron desde lejos dándome muestra de su hermandad, en especial Evalina Simba Pascoal. A mis tíos y tías por sus consejos moral y espiritual, a mis primos. A mi madre brasileña y amiga a la vez, Margareth Gomes Almeida Gutiérrez por su cariño y consejos sabios.

A mi futura esposa a quien aprecio mucho, una persona muy especial que Dios ha enviado para coadyuvarme en las sendas de la vida y en este trabajo.

Resumen

El desarrollo socioeconómico de cualquier región requiere el empleo de energía para el funcionamiento de los diversos sectores de la economía sin embargo, la creciente demanda de energía a nivel mundial ha tenido como efecto una mayor demanda de combustibles fósiles lo cual ha conllevado a una búsqueda de combustibles alternativos como por ejemplo el biogás. En el presente trabajo se realizó una minuciosa búsqueda bibliográfica donde se define las características, obtención y componentes que forman el biogás y su aplicación en distintas áreas de la sociedad, cómo aprovechar el biogás generado en plantas de tratamientos residuales, también se estudio sobre el biogas en el contexto internacional y nacional. El estudio de los distintos tipos de biodigestores arrojó que el de campana flotante es el adecuado para el caso tratado en la investigación. Se presenta una metodología para el cálculo de las dimensiones de un biodigestor continuo utilizando las aguas albañales del hotel Pasacaballos. Como novedad fundamental en el tercer capítulo se realiza una adaptación de la metodología en aras de aprovechar la construcción civil del tanque Imhoff.

Palabras clave: Biogás, biodigestor, plantas de tratamientos, campana flotante, tanque Imhoff.

Summary

The socioeconomic development of any region requires the use of energy for the operation of the various sectors of the economy; however, the growing demand for energy worldwide has had the effect of a greater demand for fossil fuels, which has led to a search for alternative fuels such as biogas. In this work, a detailed bibliographic search was carried out defining the characteristics, collection and components that make up biogas and its application in different areas of society, how to take advantage of the biogas generated in waste treatment plants, and also studied biogas in the international and national context. The study of the different types of biodigesters showed that the one with a floating hood is the appropriate one for the case dealt with in the investigation. A methodology for calculating the dimensions of a continuous biodigester using the sewage from the Pasacaballos hotel is presented. As a fundamental novelty in the third chapter, an adaptation of the methodology is made in order to take advantage of the civil construction of the Imhoff tank.

Key words: Biogas, biodigester, treatment plants, floating hood, Imhoff tank.

Tabla de contenido

Resumen	VI
Introducción.....	1
Problema Científico.....	3
Hipótesis.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO 1. Revisión Bibliográfica.....	5
1.1. Biocombustibles gaseosos.....	5
1.1.1. Biocombustible Biogás.....	5
1.2. Poder calorífico del biogás como combustible.....	6
1.3. Aprovechamiento del biogás.....	10
1.4. Etapas de la digestión anaeróbica.....	11
1.4.1. Etapa Hidrólisis.....	11
1.4.2. Etapa acidogénica.....	12
1.4.3. Etapa acetogénica.....	12
1.4.4. Etapa metanogénicas.....	12
1.5. Condiciones ambientales.....	12
1.5.1. Temperatura.....	12
1.6. PH y AGV.....	13
1.7. Contaminación del Agua.....	14
1.7.1. Concepto de Aguas Residuales.....	15
1.7.2. Clasificación de las Aguas Residuales.....	16
1.8. El biogás en el contexto internacional.....	17
1.9. Tipos de biodigestores.....	19
1.9.1. El biodigestor.....	19

1.9.2.	Biodigestor de flujo estacionario.....	19
1.9.3.	Biodigestor de flujo semicontinuo.....	19
1.9.4.	Biodigestores de flujo continuo.....	20
1.9.5.	De cúpula fija (chino).....	20
1.9.5.1.	Ventajas.....	21
1.9.5.2.	Desventajas.....	21
1.9.6.	De cúpula móvil o flotante (hindú).....	22
1.9.7.	Digestor Tubular de polietileno o plantas de globo.....	23
1.9.8.	Biodigestor plástico de bajo costo.....	26
1.10.	Biodigestores en el contexto cubano.....	27
1.10.1.	Proyectos y empresas implicadas.....	27
1.10.2.	Proyectos relacionados a las energías renovables de la biomasa.....	28
1.11.	Mantenimiento.....	28
	Conclusiones parciales del capítulo 1.....	30
	Capítulo 2. Metodología para el dimensionamiento de un biodigestor.....	32
2.1.	Selección del tipo de biodigestor a utilizar.....	32
2.2.	Preliminares para el diseño del biodigestor.....	32
2.2.2.	Condiciones climáticas.....	33
2.2.3.	Información Habitacional del hotel Pasacaballo.....	33
2.3.	Planta de tratamiento residuales.....	34
2.3.1.	Tanque Imhoff.....	34
2.3.2.	Diseño del tanque Imhoff.....	34
2.4.	Características de las aguas del hotel pasacaballos. Tratamiento.....	36
2.5.	Metodología para el cálculo de parámetros y dimensiones del biodigestor de campana flotante.....	39
2.5.1.	Producción de excreta por especies.....	39

ΣE_o = sumatoria de excreta de ovejas kg.	39
Ndp = números días pesados.....	39
Ndp = números días pesados.....	40
2.5.1.3. Potencial de biomasa	42
2.5.1.4. Agua necesaria	42
2.5.1.5. Biomasa disponible.....	43
2.6. Dimensionamiento de un biodigestor tipo hindú	44
2.6.1. Tiempo de retención de la biomasa	44
2.6.2. Volumen de digestión de la biomasa	45
2.6.3. Volumen de producción diaria de biogás	45
2.6.4. Volumen total del biodigestor.....	46
2.6.5. Diámetro y altura útil.....	46
2.6.7. Dimensionamiento de la cámara de carga	48
2.6.8. Dimensionamiento de la cámara de descarga.....	48
2.6.9. Dimensionamiento del gasómetro	49
2.6.10. Dimensionamiento de la pared divisora	51
2.6.11. Dimensionamiento del caño guía.....	51
Conclusiones parciales del capítulo 2.....	52
CAPÍTULO 3. Análisis de resultado	54
3.1. Introducción	54
3.2. Producción de excreta humana por día	54
Conclusiones parciales del capítulo 3.....	59
Conclusiones Generales.....	60
Recomendaciones.....	61
Bibliografía.....	62
Anexos.....	66

Introducción.

El desarrollo global y la difusión de los digestores de biogás inició en la década de 1970, y hoy en día existen probablemente más de 30 millones de plantas de biogás en todo el mundo, la mayoría de ellas pequeños sistemas en áreas rurales de Asia (**UNAM, 2018**).

Las plantas de biogás, como tecnología para el tratamiento de residuos orgánicos, se han ido extendiendo a diversos sectores productivos del país, especialmente en el sector campesino; sin embargo, muchas de las instalaciones que se construyen carecen de un análisis previo de viabilidad económica. Es así que, surge la necesidad, de encontrar una tecnología apropiada, utilizando recursos locales disponibles como son los residuos orgánicos (excretas humanas, estiércoles, basura orgánica, plantas y las aguas albañales), los cuales pueden ser usados como medio para producir biogás y biofertilizante mediante biodigestores (**Barrena & Maicelo, 2010**); El uso del biogás en las cocinas constituye una tecnología limpia, que no produce hollín, ni suciedades en ollas, los gases no son nocivos a los ojos y su combustión no perjudica a los pulmones. La ignición es fácil y el control de la chispa resulta cómodo. La efectividad puede llegar al 60 % en cocinas bien operadas. La amplia disponibilidad de este tipo de equipos y su fácil modificación para el uso con biogás hace promisorio e interesante su utilización a gran escala (**López, 2014**). De esta manera se podrá mejorar los servicios de la cocina del hotel Pasacaballos, utilizando la producción del biogás en la cocción de alimentos ahorrando así el alto consumo de GLP del mismo.

El hotel Pasacaballos ofrece un servicio personalizado, caracterizado por la amabilidad y la rapidez de respuesta, brindándole al visitante un lugar tranquilo y acogedor de descanso, en un ambiente natural alejado de la urbe. Para este propósito cuenta con 188 habitaciones, de ellas 36 habitaciones triples y 152 dobles (10 con cama matrimonial). Todas las habitaciones están climatizadas, poseen televisión satelital, caja de seguridad, servicio telefónico, baño privado, agua fría y caliente las 24 horas. Otros servicios que ofrece son la venta de tarjetas telefónicas, wifi, alquiler de cajas de seguridad, cambio de moneda y servicios médicos las 24 horas.

De igual modo, el hotel posee otras áreas de servicio como: restaurante el paisaje, con capacidad para 198 comensales. Está ubicado cerca de la recepción del hotel y del lobby-bar. Este restaurante oferta servicios a la carta y buffet (el servicio se determina a partir de la cantidad de clientes) con amplia gama de platos de la cocina internacional y de la

tradicional cubana, en un ambiente agradable y acogedor; restaurante las golondrinas ubicado en la planta baja del hotel, con capacidad para 100 comensales; restaurante océanos, ubicado cerca de la recepción del hotel; bar-café, ubicado en el área del lobby y cerca del restaurante el paisaje, con capacidad para 28 plazas y ofertas variadas de bebidas y alimentos ligeros, disponible las 24 horas;

snack bar-piscina, diseñado para el disfrute de variadas ofertas gastronómicas en el área de la piscina; ranchón piscina, localizado en el área de piscina, con capacidad para 40 plazas; sala de fiestas, con capacidad para 130 plazas, y con área para fumadores con capacidad de 50 plazas; tienda caracol, orientada a la venta de artículos varios; centro de negocios, Se dispone de 4 salones que le brindan la posibilidad al cliente de realizar eventos, conferencias, celebraciones, banquetes y otras similares y un club-house, Destinado especialmente a la recreación con variados juegos como tenis de mesa, billar, damas parchís, cartas, dominó, y otros.

Todos los servicios que implican cocción de alimentos son realizados con gas licuado del petróleo (GLP). En esta tesis se pretende estudiar la posibilidad de suplir parte de este gas licuado con la producción de biogás a partir de las aguas residuales del hotel y aprovechando parte de las construcciones civil de la planta de tratamiento de aguas albañales.

El biogás es un combustible gaseoso producido a partir de biomásas húmedas mediante digestión anaerobia. El gas consiste básicamente en 55-70% de metano y 30-45% de dióxido de carbono. Los sustratos típicos incluyen estiércol, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTAR), residuos orgánicos industriales, residuos agrícolas y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (**UNAM, 2018**). Además, los recursos empleados como materia prima para la generación del biogás pueden ser cultivos energéticos; o materiales residuales restantes de la actividad agrícola (**Becerra, 2017**).

Este tipo de energía está principalmente orientado a suplir necesidades y generar oportunidades, siendo principalmente, como lo afirman (**Rodrigo, 2008**) Sin embargo, en las actividades realizadas en hotel se consume un elevado nivel de agua, es decir se desea aprovechar las aguas albañales y los residuos sólidos para producir el biogás para la cocción de alimentos. De allí surge la necesidad de plantear el siguiente problema científico:

Problema Científico.

En el hotel la cocción de todos los alimentos se realiza con gas licuado del petróleo (GLP), con el consiguiente alto costo, por lo tanto, es atractivo el estudio para la implementación de un biodigestor a partir de las aguas albañales del hotel.

Hipótesis

Es posible generar biogás a partir de las aguas albañales, diseñando un biodigestor que aproveche parte de la construcción civil de la planta de tratamiento de residuos para producción de biogás a fin de sustituir parte del combustible GLP utilizado en la cocción de alimentos

Objetivo general.

Diseñar un biodigestor utilizando los residuos albañales del Hotel Pasacaballos Provincia de Cienfuegos.

Objetivos específicos.

- Realizar la búsqueda bibliográfica que sostienen la investigación para el diseño del biodigestor en el hotel Pasacaballos utilizando los residuos albañales.
- Realizar el estudio de tratamiento de sistemas de las aguas residuales de acuerdo a las características de la planta del Hotel Pasacaballos.
- Seleccionar el tipo de biodigestor a utilizar teniendo en cuenta las características constructivas de la planta de tratamiento de las aguas albañales
- Determinar la capacidad del biodigestor.
- Analizar los resultados y la factibilidad económica del biodigestor.

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1. Revisión Bibliográfica.

1.1. Biocombustibles gaseosos.

Los biocombustibles son productos energéticos derivados de la biomasa, de forma general estos se pueden clasificar en líquidos, sólidos y gaseosos (IMP, 2016).

Los biocombustibles gaseosos más importantes son el biogás y biohidrógeno. Para el caso de biogás se presentan sus propiedades, materias primas empleadas para su producción, etapas involucradas en su proceso de conversión que van desde la colecta hasta su uso final ya sea como combustible para el transporte, medio de calentamiento y/o fuente para generar energía eléctrica; y finalmente los beneficios que genera a la sociedad y medio ambiente (IMP, 2016).

1.1.1. Biocombustible Biogás.

Dentro de los biocombustibles gaseosos el biogás es el más conocido. De acuerdo al Programa Especial para El Aprovechamiento de Energías Renovables 2013-2018 (SENER, 2014), el Biogás se define como: “Gas que se produce por la conversión biológica de la biomasa como resultado de su descomposición”.

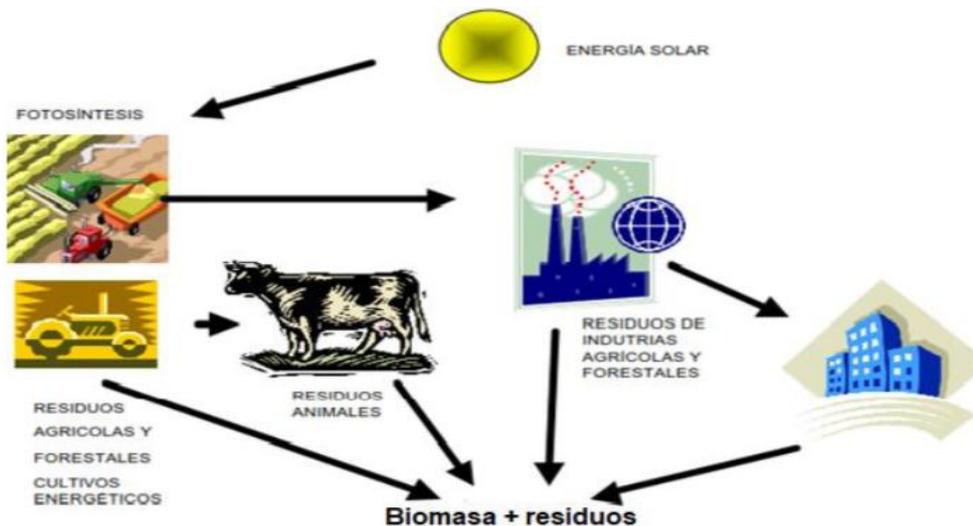


Figura 1.1. Definición de biomasa. Fuente: (Lujan, 2018).

De forma general en la literatura se define el "Biogás" como un gas producido por la digestión anaerobia de diferentes formas de la materia orgánica y se compone principalmente de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). Las materias primas típicas para la producción de biogás son el estiércol, las aguas residuales, los residuos de la producción de cultivos (paja o rastrojo), la fracción orgánica de los residuos procedentes de los hogares y la industria, así como los cultivos energéticos, incluyendo el maíz y el ensilado de hierba **(IMP, 2016)**.

Un proceso anaeróbico es controlado por diferentes variedades de microorganismos, contenidos en el tanque o digester anaerobio, por lo general a una temperatura de 30 a 40°C. El tiempo requerido para la transformación de la materia prima puede durar desde varias horas (tal es el caso de azúcares y el alcohol), hasta varias semanas (en el caso de que se traten materias como las hemicelulosas, grasas y proteínas) **(IMP, 2016)**. La composición de biogás se presenta en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Características biogás. Fuente: (Romero, 2017)

Composición del Biogás		
Componentes	Unidad	Contenido
Metano	%	50-70
Dióxido de carbono	%	30-45
Nitrógeno	%	1-2
Oxígeno	%	0,1
Sulfuro de hidrogeno	%	0,01-0,40
Saturación con vapor de agua	%	80-100

1.2. Poder calorífico del biogás como combustible.

El poder calorífico del biogás es de 4.700 a 5.500 kcal/m³ o 6,27 kWh/m³ dependiendo del contenido de gas metano (CH₄) y puede generar una cantidad de calor equivalente a 22.000 BTU/m³ o 21.5 MJ/m³ (573 BTU por pie cúbico), valor que puede variar entre 19.7 y 23 MJ/m³. Su temperatura de auto-ignición es similar a la del metano puro y varía de 650 - 750 °C. **(Romero, 2017)**.

En la tabla 1.2 se presentan algunas equivalencias energéticas del biogás.

Tabla 1.2. Equivalencias energéticas. Fuente: (Romero, 2017)

Equivalencias energéticas 1 m ³ de Biogás		
Cantidad equivalente	Tipo de biomasa o sustrato	Capacidad energética
0,6 kg	Diésel	12 kWh/kg
0,7 kg	Carbón	8,5 kWh/kg
0,6 m ³	Gas natural	5,3 kWh/m ³
0,24 m ³	Gas propano	25 kWh/m ³
1 m ³	Generar electricidad	2,2 kWh

En la tabla 1.3 se exponen las características más relevantes del biogás en relación con otros gases.

Tabla 1.3. Característica de Biogás y comparación con otros gases. Fuente: (Romero, 2017)

Características de biogás en comparación con otros gases						
Tipo de gas	Unidad	Biogás	Gas natural	Propano	Metano	Hidrogeno
Poder calorífico	kwh/m ³	6	10	26	10	3
Peso específico	kg/ m ³	1,25	0,7	2,01	0,72	0,09
Relación a la densidad del aire		0,9	0,54	1,51	0,55	0,07
Temperatura de encendido	°C	700	650	470	600	585
Contenido de oxígeno para explosión	Vol.- %	6-12	4,4-15	1,7-10,9	4,4-16,5	4-7

De la lectura de esta tabla se desprende que el biogás tiene un poder calorífico menor que el gas natural y el gas propano, dependiente lógicamente del % de gas metano. Su densidad es de 1,25 kg/m³ y menos pesado que el aire. Esta característica hay que tenerla muy en cuenta cuando se ingresa en zonas en donde haya fugas de biogás, ya que el biogás no se

acumula en el suelo, sino que sube a la superficie rápidamente y se mezcla con el aire formando una mezcla explosiva **(Romero, 2017)**.

La temperatura de encendido del biogás es relativamente alta en el orden de 700 °C como promedio. La velocidad de encendido es de 0,25 m/s. Debido al contenido de CO₂ del biogás se puede quemar cuando se mezcla con oxígeno entre un contenido de 6-12%. El propano e hidrógeno requieren de menores porcentajes de oxígeno para encenderse **(Romero, 2017)**.

El contenido de gas metano y dióxido de carbono que se produce de la materia orgánica depende del tipo de sustrato que se aprovecha en el biodigestor.

Tabla 1.4. Contenido de CH₄ y CO₂. Fuente: (Romero, 2017)

Contenido de CH ₄ y CO ₂					
Gas	Desechos agrícolas	Lodos cloacales	Desechos industriales	Rellenos sanitarios	Características
CH ₄	30-80%	40-80%	40-80%	45-65%	Inflamable, inodoro
CO ₂	30-50%	20-50%	30-50%	30-55%	Forma acida, inodoro, asfixiante
Vapor de agua	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación	Corrosivo
H ₂ S	1000-300 ppm	0-1000 ppm	0-5000 ppm	0-10000 ppm	Inflamable tóxico, fétido
H ₂	0-2%	0-5%	0-2%	0-2%	Inflamable, inodoro
NH ₃ (amoníaco)	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	Corrosivo, irritante.
N ₂	0-15%	0-3%	0-1%	0-30%	Inerte, inodoro, asfixiante
O ₂	0-1%	0-1%	0-1%	0,5%	Corrosivo
Orgánicos	Trazas	Trazas	0-5 ppm	10 ppm	Corrosivos, olores

En la tabla 1.5 se indican las características de los componentes del biogás.

Tabla 1.5 Características de los componentes de biogás. Fuente: (Romero, 2017)

Características de los componentes del biogás						
	Unidad	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	CO	H
Peso específico	kg/m ³	0,72	1,85	1,44	1,57	0,084
Relación de densidad con el aire		0,55	1,53	1,19	0,97	0,07
Temperatura de encendido	°C	600	-	270	605	585
% de O ₂ para explosión	Vol. %	4,4-16,5	-	4,3-45,5	10,9-75,6	4-77

El biogás no se quema o explota con facilidad. No se enciende por si solo, sino que necesita una mezcla de oxígeno-biogás para que encienda. Se debe formar una mezcla homogénea para que se pueda quemar. No se puede encender con un fósforo una fuga de biogás que sale por un agujero de una membrana de cubierta de un biodigestor. El fósforo se apaga inmediatamente al entrar en contacto con el biogás por falta de una mezcla adecuada de oxígeno **(Romero, 2017)**.

Eso si hay que tener mucho cuidado cuando se escapa el biogás por una rasgadura en la membrana de cubierta o por alguna fuga en un tanque de almacenamiento, cuando este biogás tiene el tiempo suficiente para mezclarse con suficiente oxígeno y alcanza a formar una mezcla explosiva con un contenido de aire de 6-12 % **(Romero, 2017)**.

1.3. Aprovechamiento del biogás.

Existen diversas opciones para la utilización del biogás. Dentro de éstas destacan la producción de calor o vapor, generación de electricidad y combustible de vehículos (FAO, 2011). Entre los usos finales del biogás, podemos encontrar en la iluminación, en la cocción de alimentos, en la industria, etc. Y puede ser aprovechado en cualquier tipo de calderas cambiando el quemador y el ingreso de aire (oxígeno) para la combustión del biogás (Romero, 2017).

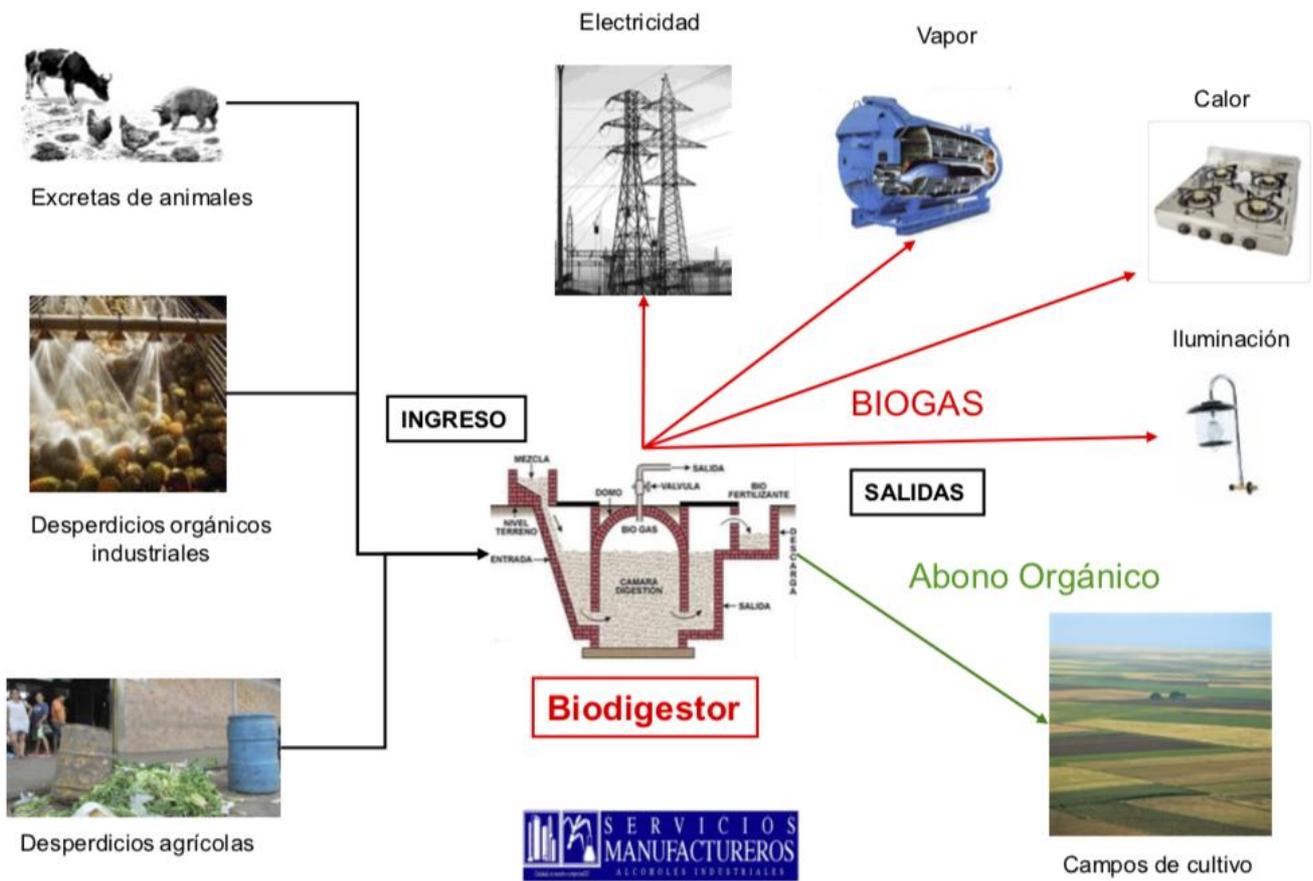


Figura 1.2 Esquema básico de la producción del biogás. Fuente: Recuperado del Realidad, impacto y oportunidades de los biocombustibles en Guatemala (Sector productivo).

1.4. Etapas de la digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea (FAO, 2011).

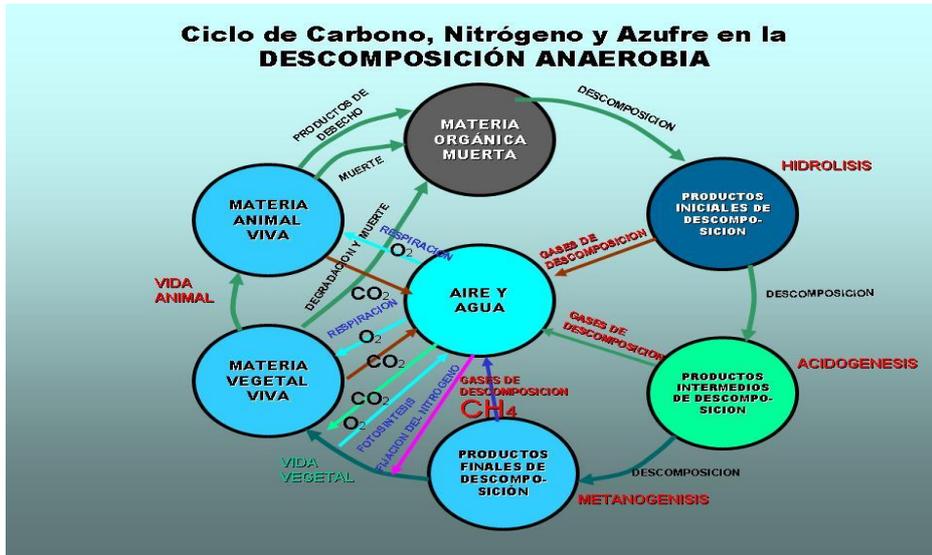


Figura 1.3 Descomposición anaeróbica.

La digestión anaerobia es un proceso químico en el cual se distinguen cuatro etapas en cada una de las cuales intervienen bacterias específicas (Martin, 2016). Estas etapas son las siguientes:

1. Etapa Hidrolisis.
2. Etapa fermentativa o acidogénica
3. Etapa acidogénica
4. Etapa metanogénicas

1.4.1. Etapa Hidrólisis

Durante esta primera etapa los carbohidratos, polisacáridos, lípidos y proteínas de la materia orgánica son reducidos a moléculas más simples. En esta etapa se puede ver los productos iniciales de descomposición como: nitrógeno amoniacal, dióxido de carbono y ácido sulfuroso.

1.4.2. Etapa acidogénica.

Los compuestos solubles producidos en la primera etapa son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono de los cuales se encuentran los productos intermedios de descomposición como: nitrógeno de nitritos, dióxido de carbono y azufre.

1.4.3. Etapa acetogénica

Se produce acetato, dióxido de carbono e hidrógeno. Las moléculas de la acidogénesis son captadas por los microorganismos acetógenas para emplearlas en la producción de acetato, dióxido de carbono e hidrógeno **(Martin, 2016)**.

Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados homoacetogénicos. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como mezcla H_2/CO_2) produciendo como único producto acetato. Al contrario que las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. **(FAO, 2011)**.

1.4.4. Etapa metanogénicas

Los ácidos orgánicos generados en la etapa anterior son convertidos en metano. Continúa la producción de dióxido de carbono y otros gases **(García, 2012)**. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización **(FAO, 2011)**. De la etapa metanogénesis, se encuentran los productos finales de descomposición como: nitrógeno de nitrato, dióxido de carbono, sulfatos y humus.

1.5. Condiciones ambientales.

1.5.1. Temperatura.

En el desarrollo de cualquier proceso bioquímico, la temperatura es uno de los parámetros ambientales más importantes ya que mejora ó inhibe a grupos microbianos específicos, esto debido a que las actividades implican reacciones enzimáticas, donde las enzimas son complejos moleculares sensibles a la temperatura. Otra razón son los diferentes tiempos de activación de los grupos bacterianos durante el curso de la digestión, ya que cada uno de estos grupos, tiene una temperatura óptima en donde se puede estabilizar su tasa de

crecimiento celular máximo. En el caso del tratamiento anaerobio de lodos, la temperatura del proceso determina la rapidez y el grado de avance de la digestión anaerobia (**McKeown, 2009**).

Los rangos de temperaturas dependen de la bacteria que se dejará proliferar y tienen incidencia directa en los días de fermentación para obtener el biogás (**Medel, 2010**).

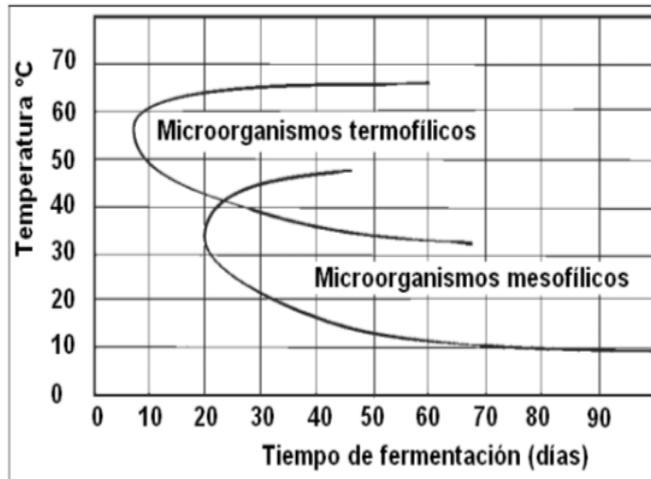


Figura 1.4. Rangos de operación para organismos mesofílicos, o termofílicos. Fuente: (**Medel, 2010**)

Es importante que la temperatura se mantenga constante ya que cada grupo bacteriano posee un grado de temperatura óptimo de crecimiento. Si la temperatura fluctúa, no se podrá mantener ninguna población metanógena en forma estable y una disminución en la población de un determinado grupo puede afectar al proceso de digestión anaerobia, reduciendo el grado de estabilización del lodo y con ello la formación de CH_4 (**Chen, 2008**).

Los reactores con régimen termófilo necesitan un control de temperatura para mantener una producción constante de CH_4 , mientras que los que se encuentran bajo régimen mesófilo pueden operar en un rango de temperatura más amplio. En este último caso, en latitudes donde se alcanzan temperaturas de congelación, se hace necesario utilizar parte de la energía producida en el calentamiento del reactor.

1.6. PH y AGV.

En cuanto al pH se establece que el funcionamiento óptimo de la digestión anaerobia está alrededor de la neutralidad, este se ubica entre 6.8 y 7.4. Está íntimamente relacionado a la concentración de AGV (ácidos grasos volátiles) y su relación con la alcalinidad del sistema.

Esta condición es imperante en cualquier condición de temperatura, aunque se puede recurrir a un sistema de dos fases, en donde las dos primeras etapas del proceso se establecen como un sistema de condición acidógena y las dos últimas como la condición metanógena. Se debe destacar la importancia de las bacterias sulfatorreductoras y acetógenas pues estas poblaciones microbianas son quienes mantienen los niveles ideales de pH mediante el consumo óptimo de AGV, y también mantienen un equilibrio perfecto entre los productores y consumidores de H₂. Este equilibrio es conocido como asociación sintrófica o transferencia interespecie de H₂ (Kalia V. P., 2008) y (Chen, 2008).

1.7. Contaminación del Agua.

La contaminación del agua se da al introducir algún agente que altere la calidad y composición química, la Organización mundial de la Salud establece que el agua contaminada no está en condiciones de consumirla. Los ríos, lagos y quebradas son vulnerables a la contaminación producida por actividades del hombre (Alvarez, 2008).

Las masas de agua realizan el proceso de auto purificación pues tienen organismos que metabolizan y reaccionan con sustancias contaminantes hasta hacerlas desaparecer En la Tabla 1.9 se puede apreciar los principales contaminantes del agua (Alvarez, 2008):

Tabla 1.6. Contaminantes del Agua. Elaborado por: Gabriela García. Fuente: (Alvarez, 2008)

Contaminantes	Descripción
Agentes Patogénicos	Se refiere a bacterias virus o parásitos de desechos orgánicos que tienen contacto con el agua.
Desechos	Existen bacterias en el agua que sirven para biodegradar los desechos, estas pueden llegar a agotar el oxígeno del agua, extinguiendo así, a las especies del mar.
Sustancias inorgánicas	Ácido y metales tóxicos que dañan la composición del agua.
Sustancias orgánicas	Como el petróleo, plaguicidas y detergentes.

Nutrientes vegetales	Provocan el crecimiento de plantas acuáticas que al morir agotan el oxígeno del agua.
Sedimentos	Materia suspendida en el agua.
Aumento de temperatura	Disminuye la cantidad de oxígeno en los océanos.

1.7.1. Concepto de Aguas Residuales

Las aguas residuales o negras son aquellas que están contaminadas o sucias debido al uso en hogares, fabricas, actividades ganaderas, etc. Estas contienen detergentes, materia orgánica, residuos de ganados, plaguicidas entre otras sustancias toxicas es por esto que deben tener un tratamiento adecuado, se las conoce también como aguas negras o cloacales (**Diaz, 2008**). Algunos contaminantes de las aguas residuales se indican en la Tabla 1.7 a continuación:

Tabla 1.7 Contaminantes en las Aguas Residuales Fuente: Recuperado del proyecto de investigación de Gabriela Estefanía García Galarza, (Galarza, 2016).

Contaminantes	Descripción
Sólidos en Suspensión	Estos pueden dar lugar a la formación de depósitos de fango.
Materia Orgánica Biodegradable	Constituidos por proteínas, carbohidratos y grasas de animales. Se mide en Función del DBO (Demanda química de oxígeno) y DQO (Demanda Bioquímica de Oxígeno).
Patógenos	Presentes en el agua residual, transmiten enfermedades patógenas.
Nutrientes	La acumulación de nitrógeno, fosforo y carbono al verter en el terreno en exceso se contaminan las aguas subterráneas.
Contaminantes Prioritarios	Se hallan en el agua residual, son orgánicos o inorgánicos, son de alta toxicidad.

Materia Orgánica Refractaria	Resiste los métodos de tratamiento. Ejemplos pesticidas, fenoles o agente tenso activo.
Sustancias Toxicas y Metales Pesados	Se introducen en las aguas residuales por actividades comerciales e industriales.
Sólidos inorgánicos Disueltos	El sodio, el calcio y sulfatos se introducen al agua por el uso de la misma

1.7.2. Clasificación de las Aguas Residuales

Los procesos que implican el tratamiento de aguas residuales se dan en función de la necesidad, es decir si se desea purificar el agua, clarificarla para enviarla al subsuelo o para utilizarla en el riego (**Diaz, 2008**). Es importante evitar que las aguas residuales contaminen las aguas freáticas. Existen distintos tipos de aguas residuales en función de su origen y características como se indica en la Tabla 1.11.

Tabla 1.8. Tipos de Aguas Residuales. Fuente: Recuperado del proyecto de investigación de Gabriela Estefanía García Galarza, (Galarza, 2016).

Tipos de aguas residuales	Descripcion
Domésticas	Se originan en las viviendas familiares, los desechos pueden ser de humanos o de animales.
Sanitarias	Constituyen las aguas domésticas y en ocasiones se suman desechos industriales.
Pluviales	Es el agua de lluvia que fluye en la superficie de la tierra, pavimentos y techos.
Combinadas	Es la mezcla de aguas industriales, domesticas, subterráneas o pluviales.
Desechos Industriales	Cualquier compuesto solido o líquido que proviene de un proceso industrial.
Aguas Negras Frescas	De origen reciente y aun contienen oxígeno.
Aguas Negras en Proceso de Alteración	Pueden no contener oxigeno sin que lleguen a la putrefacción.

Aguas Negras Sépticas	Es cuando no existe oxígeno y empieza la putrefacción en condiciones anaerobias.
-----------------------	--

Se puede mencionar que las aguas domésticas o grises son generadas por diversos usos del hombre ya sea por la preparación de alimentos, lavado de platos, limpieza de ropa, el uso del baño son aguas que contienen jabón y residuos grasos de cocina. El agua residual doméstica fresca y aeróbica tiene olor a queroseno mientras que las envejecidas su olor es más profundo **(Galarza, 2016)**.

1.8. El biogás en el contexto internacional.

A nivel mundial, el uso del biogás es variante, va desde emplearse como combustible para la cocina, calefacción, electricidad, combustible para los vehículos, hasta utilizarlo como el gas “principal” para ser procesado e introducido en gasoductos de gas natural **(Defra., pp. Defra, 2010; Dutta et al., 1997; Guardian, 2008)**. Otros usos están relacionados con el empleo de éste para hacer metanol y ayudar a prolongar la conservación de frutas y granos por la inhibición del metabolismo de ciertos insectos, hongos y bacterias **(Mae-Wan, 2008)**.

Las mayores aplicaciones del biogás se han dado en China, India y Europa. China es de los países pioneros en el uso del biogás. Este país perteneciente al continente asiático desarrolló un programa que inició en los años setenta con un resultado de más de 7 millones de digestores, aunque sufrió de varias fallas **(Boyle, 2004)** figura 1.9.

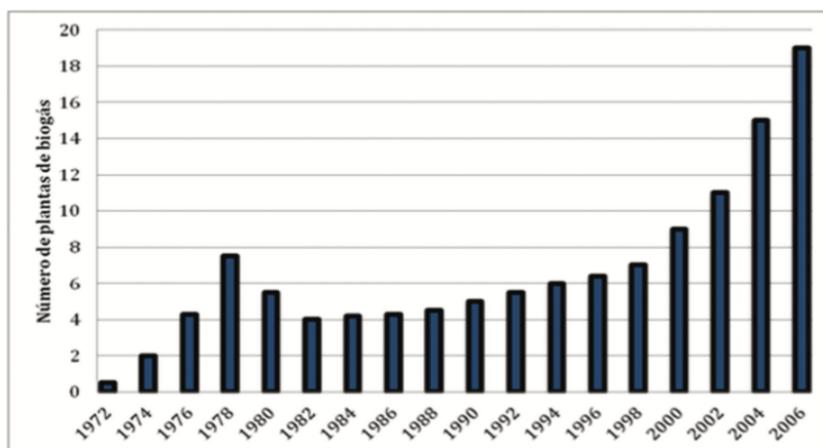


Figura 1.5. Expansión de la producción de biogás en China. Fuente: (Deublein D. S. A., 2008)

La generación global de biogás ha aumentado rápidamente desde el año 2000. Durante el período 2000 - 2014, el crecimiento anual promedio de la producción fue del 11.2%. En 2016,

la producción de biogás superó los 60 mil millones de Nm³. Usando un factor de densidad de energía promedio de 21.6 MJ / Nm³ (60% de metano), la producción total de biogás fue 1.3 EJ (UNAM, 2018).

En el período 2000-2016, Europa fue el mayor productor de biogás seguido de Asia y de América, como se muestra en la figura 1.8. Sin embargo, el crecimiento en Europa y Asia parece haberse desacelerado en los últimos años. En América, la producción de biogás no

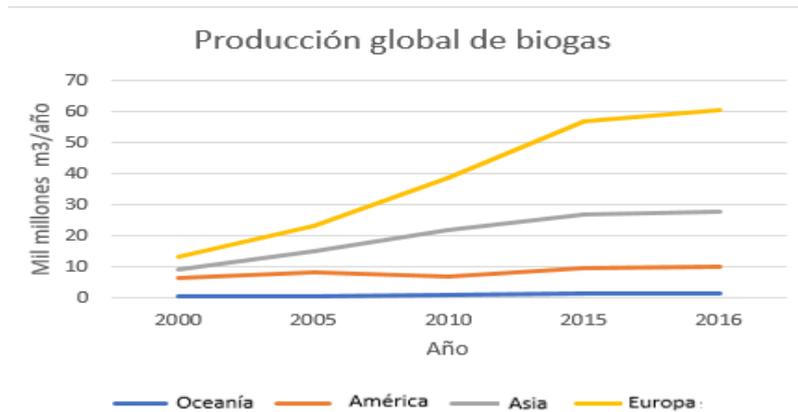


Figura 1.6. Producción global de biogás. Fuente: (Own calculation based on Global Bioenergy Statistics 2017 & 2018)

ha aumentado significativamente en los últimos 20 años. África produce solo el 0.03% de la producción mundial, por lo que no se incluye en la figura (UNAM, 2018).

El biogás ofrece la oportunidad de obtener energía limpia de los residuos agrícolas y otros desechos y, por lo tanto, aumentar las fuentes de empleo y los ingresos en las zonas rurales. En algunos países, este ha sido históricamente el principal motor del desarrollo en el sector del biogás (UNAM, 2018).

El valor de la industria del biogás se puede atribuir principalmente a tres características del biogás:

Tratamiento de residuo y reciclado de nutrientes. El proceso de generación de biogás ofrece un tratamiento respetuoso con el medio ambiente de una amplia gama de desechos y residuos orgánicos y también facilita el reciclaje de nutrientes. La producción de biogás es una opción energéticamente eficiente y, por lo tanto, atractiva para el tratamiento de aguas residuales y lodos de aguas residuales.

Reducción de gases de efecto invernadero (GEI). El proceso de biogás ofrece una solución respetuosa con el ambiente, ya que la producción de biogás a menudo reduce las emisiones de metano del estiércol y los desechos orgánicos. En años recientes ésta ha sido una de las principales fuerzas impulsoras del desarrollo en Europa y en algunos países asiáticos.

1.9. Tipos de biodigestores.

1.9.1. El biodigestor.

Un Biodigestor es un reactor donde se colocan los residuos orgánicos para ser digeridos, éste puede tener cualquier forma esto quiere decir que puede ser un tanque de forma rectangular, cilíndrica, esférica o semiesférica, todo esto dependiendo de las necesidades del usuario. Sin embargo, para construcciones nuevas, no se recomienda usar tanques en forma rectangular, dado que requieren mayor cantidad de material de construcción y tienen varias zonas de composición diferente y esto implica menor eficiencia del sistema **(Ortega, 2013)**.

De acuerdo con la forma de inyección de la materia orgánica al biodigestor, en forma general se clasifican en estacionario, semicontinuo y continuo.

1.9.2. Biodigestor de flujo estacionario.

Estos Biodigestores se cargan una sola vez y se descargan cuando han dejado de generar gas, por lo general para este tipo de digestor se requiere de una mayor mano de obra y un espacio para almacenar la materia prima si se genera constantemente y de un depósito de gas **(Ortega, 2013)**.

1.9.3. Biodigestor de flujo semicontinuo.

Este tipo de Biodigestor se construye enterrado, se carga por gravedad una vez al día y en la parte superior flota una campana donde se almacena el gas. por lo general requieren de menos mano de obra, pero de una mezcla más fluida o movilizadora de manera mecánica y de un depósito de gas (si este no se utiliza en su totalidad de manera continua **(Ortega, 2013)**):

1.9.4. Biodigestores de flujo continuo.

Se usan generalmente para tratamiento de aguas residuales, tienden a ser grandes de corte industrial, con sistemas comerciales para el control y gestión del proceso. La producción de Biogás es mucho mayor pueden ser **(Ortega, 2013)**:

- Sistema de desplazamiento horizontal (movimiento por flujo pistón, gravedad).
- Sistema de tanques múltiples.
- Sistema de tanque vertical.

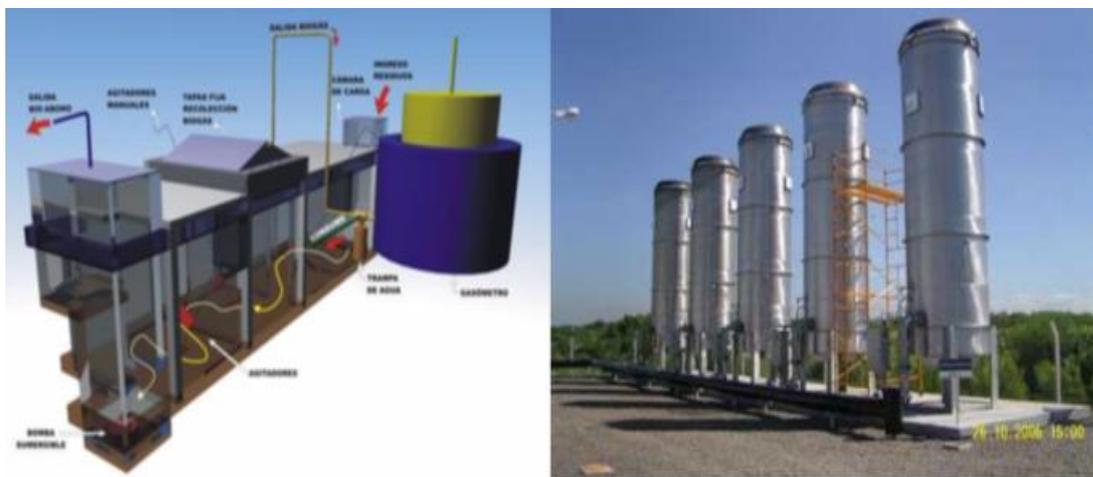


Figura 1.7. Biodigestor de flujo continuo. Fuente:Recuperado de la Monografía “Energía del biogás: una opción sustentable para el medio rural y semiurbano” pag. 41

De acuerdo con la forma constructiva los biodigestores se clasifican en:

- De cúpula fija (chino).
- De cúpula móvil o flotante (hindú).
- De salchicha, tubular o biodigestores familiares de bajo costo.

1.9.5. De cúpula fija (chino).

Estas plantas consisten en un recipiente fijo e inmóvil para gas, que se coloca en la parte superior del digestor. Cuando comienza la producción de gas, la mezcla se desplaza hacia el tanque de compensación. La presión de gas aumenta debido al aumento de volumen del gas almacenado y con la diferencia de altura entre el nivel de la mezcla en el digestor y el nivel de la mezcla en el tanque de compensación **(Martín, 2017)**.

1.9.5.1. Ventajas.

- Costos de construcción relativamente bajos, larga vida útil. La construcción subterránea ahorra espacio y protege al digestor de cambios de temperatura.

1.9.5.2. Desventajas.

- Frecuentes problemas con la permeabilidad para gases del recipiente de ladrillos para el gas debido a que una simple fractura en el domo superior puede causar altas pérdidas de biogás. La presión del gas fluctúa dependiendo sustancialmente de volumen de gas almacenado.

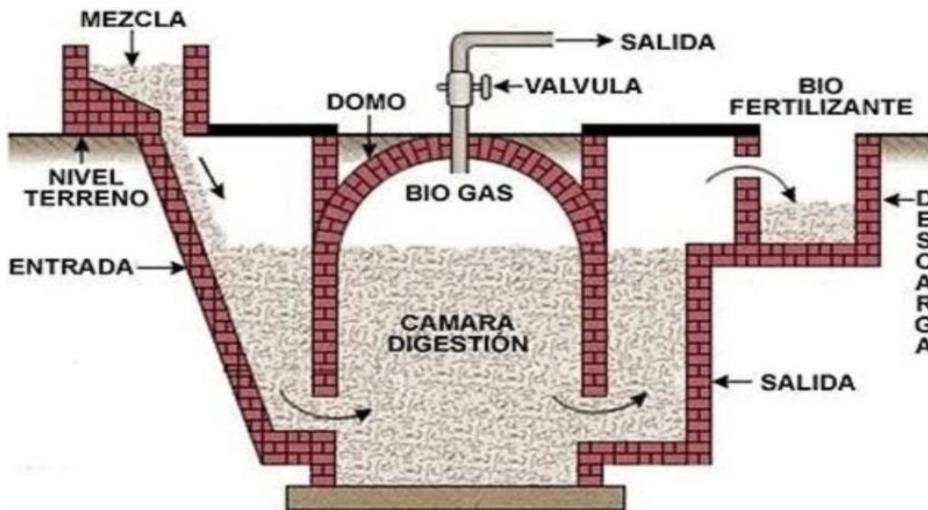


Figura 1.8 Biodigestor tipo chino. Fuente: (Zúñiga, 2007)

Para compensar el aumento de presión, el digestor posee un depósito contiguo llamado cámara de compensación se encarga de regular el aumento de la presión. En la figura siguiente se observa el funcionamiento del proceso (López, 2014).

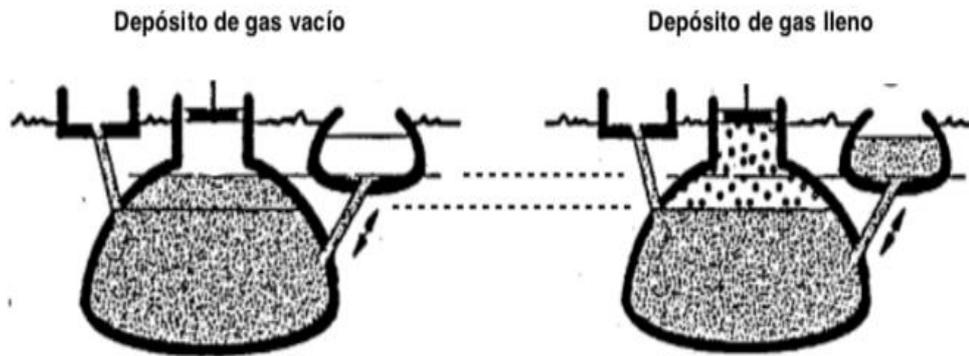


Figura 1.9 Etapas del proceso de producción de biogás. Fuente: (López, 2014)

1.9.6. De cúpula móvil o flotante (hindú).

Las plantas de tambor flotante consisten en un digester subterráneo y un recipiente móvil para el gas. El recipiente para gas flota, ya sea directamente sobre la mezcla de fermentación o en una chaqueta de agua. El gas se recolecta en el tambor de gas, que se levanta o baja, de acuerdo con la cantidad de gas almacenado (Martin, 2017).

1.9.6.1. Ventajas.

- Operación simple y fácil de entender. El volumen de gas almacenado de gas es visible directamente. La presión del gas es constante, determinada por el peso del recipiente de gas.

1.9.6.2. Desventajas.

- Las desventajas son los altos costos de los materiales para el tambor de acero, la susceptibilidad a la corrosión de las partes de acero, por lo que la vida útil de la planta es más corta.

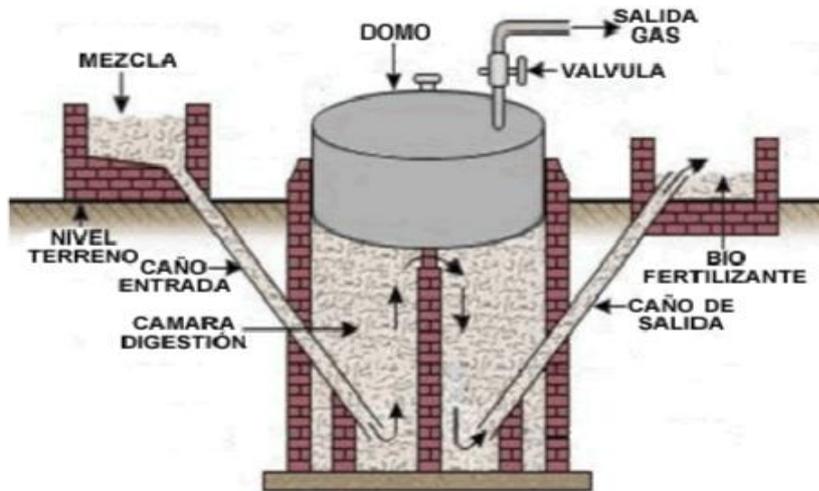


Figura 1.10 Biodigestor tipo hindú. Fuente: (Zúñiga, 2007)

La campana suele estar fabricada en metal o fibra de vidrio, y se necesita un poste guía o unos railes laterales para guiar su movimiento

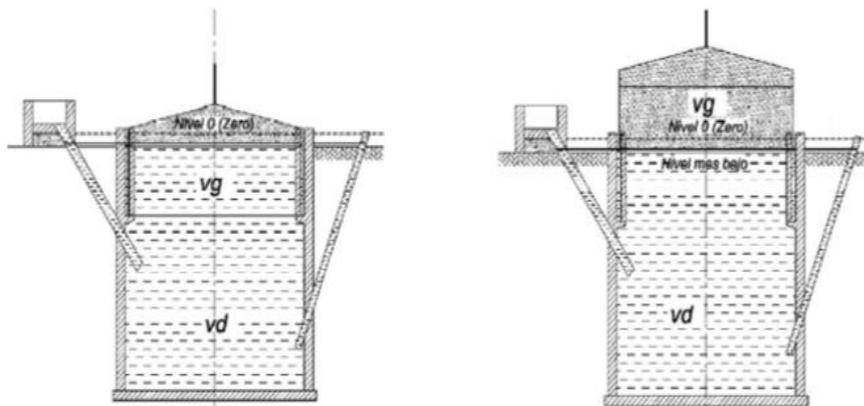


Figura 1.11 Etapas del proceso de producción de biogás en un digestor de cúpula flotante. Fuente: (López, 2014)

1.9.7. Digestor Tubular de polietileno o plantas de globo.

Recientes desarrollos han llevado al uso de digestores tubulares fabricados en polietileno los cuales han resultado en disminución de costos y eficiencias considerables. Estas unidades, las cuales varían en tamaño de 100 a 400 m³ en volumen, son fáciles de transportar, sencillas de instalar y baratas de construir (Coimbra-Araujo, 2014).

1.9.7.1. Ventajas.

- Las principales ventajas son su bajo costo, fácil transportación, poca sofisticación de construcción. Este digestor puede operar a altas temperaturas teniendo éste altas temperaturas de digestión. Posee fácil limpieza, mantenimiento y vaciado.

1.9.7.2. Desventajas.

- Alta susceptibilidad a ser dañado, baja generación de empleo.

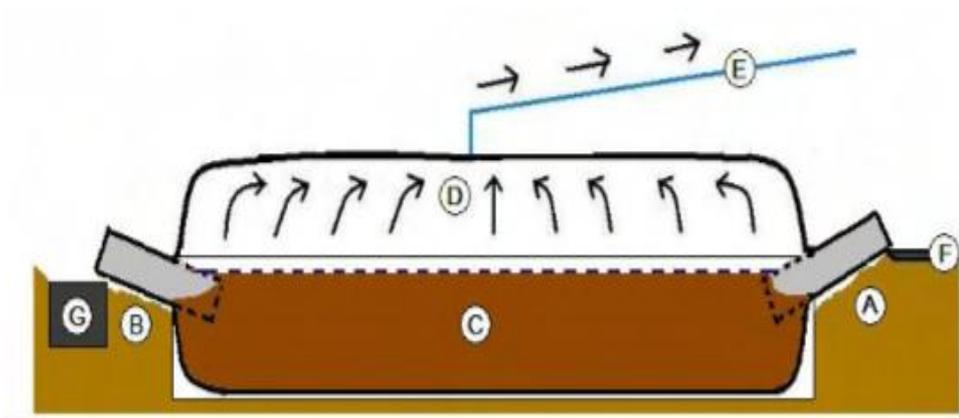


Figura 1.12. Biodigestor tubular de polietileno. Fuente: (CEDECAP, 2007)

Estos biodigestores pueden tener una durabilidad de hasta 20 años en el caso de ser dañados pueden ser fácilmente reparadas del mismo material del biodigestor usando adhesivo fuerte. Cuando se necesita el metano sólo se ejerce una pequeña presión sobre la bolsa de almacenamiento moviendo de esta forma el biogás a donde se necesita (Coimbra-Araujo, 2014).

Tabla 1.9 Comparación de biodigestor de cúpula fija y cúpula flotante. Fuente: (Grover, 2017)

Parámetros técnicos y tecnológicos	Cúpula fija	Campana flotante	Exigencias
Presión	La presión de gas aumenta según la cantidad de gas almacenado, en	Presión de gas constante	Que no afecte el proceso tecnológico

	muchos casos la presión de gas es muy alta		
Manejo	No posee partes Móviles, manejo complicado	Manejo fácil y razonable. El gas almacenado es directamente visible	Manejo más fácil posible
Construcción	Construcción subterránea que ayuda a ahorrar espacio. Bajos costos de construcción, dificultad en el sellado de la planta	Construcción subterránea. Altos costos de construcción de la campana. Pocos errores posibles en la construcción	Que la planta sea lo más fiable posible
Vida Útil	20 años o más	Hasta 15 años. En costas tropicales unos 5 años de vida para la campana	La mayor vida útil posible
Economía	Bajos costos de construcción	Altos costos de construcción de la campana. Costos de mantenimiento periódicos causados por la pintura	Menor costo posible.

Productividad volumétrica	0.15 a 0.2m ³ de biogás/volumen de reactor x día	0.5a1m ³ de biogás/volumen de reactor x día	Mayor productividad posible
Eficiencia	Se alcanza la máxima eficiencia (50% de reducción de materia orgánica) con un tiempo de retención de 30-60 días	Solo se requiere de 1/2 a 1/3 del tiempo de retención con respecto al biodigestor de cúpula fija	Mayor eficiencia posible

1.9.8. Biodigestor plástico de bajo costo.

Este digestor es ideal para el uso en casas dada sus ventajas.

1.9.8.1. Ventajas.

- Este tipo de digestor es muy económico y fácil de transportar por su bajo peso, en especial en aquellos sitios de difícil acceso.
- Al ser herméticos se reducen las pérdidas.

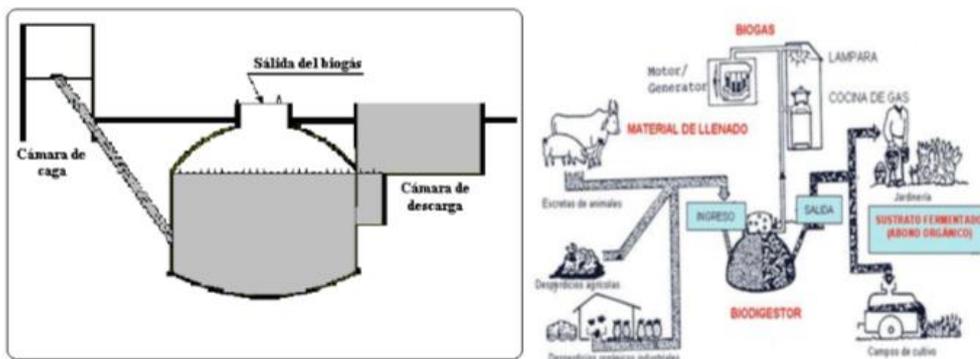


Figura 1.12 Biodigestor plástico de bajo costo. Fuente: (López, 2014)

1.10. Biodigestores en el contexto cubano.

Cuba cuenta, entre los sectores estatal y cooperativo-campesino, con más de cuatro mil digestores de biogás, instalaciones donde se garantiza la digestión anaerobia para procesar y tratar excretas. Guantánamo fue la provincia precursora en el empleo de esa fuente renovable de energía, a principios de la pasada década de los 80 (**Fernández, 2019**).

1.10.1. Proyectos y empresas implicadas.

Con tecnología propia se construyó una planta en la central provincia de Sancti Espíritus una de las mayores del país, con capacidad de 740 m³. Está en el Complejo Agroindustrial Guayos, donde funciona el primer grupo electrógeno que se sincroniza a la red eléctrica nacional de la isla que utiliza como combustible dicho biogás, logrando cada día una producción media de 350 kwh, de los cuales 310 kwh son destinados al consumo del propio centro. La planta cuenta con las excretas del Complejo que posee un multiplicador porcino, cuatro unidades cunícolas, un matadero de cerdos, reses y aves y una planta procesadora de pescado. Además, la Empresa Agroindustrial Guayos sobresale en el país por sus aportes de innovación tecnológica que buscan desarrollo sostenible (**Opcines, 2015**).

En 2008 se construyó una planta de biogás en el mayor vertedero de La Habana. La planta es de gran escala y permite la generación de energía eléctrica a partir del procesamiento de cerca de 70 a 80 m³ de residuos sólidos urbanos, es decir, entre 15 y 20 toneladas de estos desperdicios. La instalación, de tecnología alemana, fue construida con la colaboración de la Organización de Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial y tiene capacidad de generación entre 60 y 70 kWh/día (**Ecuentro Cuba, 2008**).



Figura 1.14 Provincias de Cuba donde Trabaja la EEPFIH. Fuente: (RedBiolac , 2019)

1.10.2. Proyectos relacionados a las energías renovables de la biomasa.

El fomento de experiencias, asociadas tanto al biogás como al biodiesel a partir de *Jatropha curcas* y a la gasificación de biomasa, se llevó a cabo de forma indirecta, en temas de capacitación en las 14 provincias que componen el país y con un trabajo más directo en la transferencia de tecnología sólo en nueve de estas, sobre todo formando parte de los escenarios de los proyectos internacionales que coordina la EEPFIH (Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey) como son: BIOMAS-CUBA, Agroenergía y Bioenergía, proyectos financiados por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), la Unión Europea (UE) y el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) y que accionan en las provincias de: (Guantánamo, Santiago de Cuba, Holguín, Granma, Las Tunas, Sancti Spíritus y Matanzas), (Matanzas) y (Santiago de Cuba, Las Tunas, Santi Espíritus, Villa Clara, Matanzas y la Habana) (RedBiolac , 2019), respectivamente figura:

1.11. Mantenimiento

Periódicamente se debe inspeccionar y verificar si existen filtraciones de agua o aire en los digestores de biogás, para proceder a su reparación. En los digestores de carga continua, por lo menos una vez al año, se debe vaciar completamente el digestor, retirando el lodo del fondo (Varnero, 2011)

Esto permite realizar lo siguiente:

- Tratamiento de roturas: cincelar las roturas en forma de V, raspar la superficie circundante; posteriormente llenar ese agujero en forma de V con cemento (1:1), compactar y aplicar dos o tres veces un enlucido hecho de una pasta de cemento puro.
- Cuando no se encuentran filtraciones, se debe lavar la cámara de fermentación y aplicar dos o tres capas de enlucido con una pasta pura de cemento.
- Si el enlucido está deteriorado o está deformado, es necesario sacarlo y lavar las paredes; entonces volver a enlucir, aplicando una tras otra, distintas capas de enlucido muy fino con una cuidadosa compactación.
- Cuando el agua freática penetra al biodigestor, es preciso aplicar una pasta salada con agua; se tapa el hoyo y se aprieta aplicando cemento con una cubierta de cenizas durante 20 minutos y entonces se remueve la cubierta.
- Cuando se produce una combinación de filtraciones en caños (tubos de entrada y salida) y cúpula, se cincela alrededor de la filtración y se saca el caño; entonces se vuelve a colocar cemento u hormigón de gravilla, haciendo fraguar localmente para que se fije el caño. Si el fondo se hunde o la pared se separa, se agrandará la resquebrajadura y se profundizará al máximo, rellenándose con una mezcla de hormigón con grava fina.
- Se debe revisar frecuentemente las juntas de la manguera para asegurar que no se filtre ni el agua ni el aire.

Conclusiones parciales del capítulo 1.

1. De la revisión bibliográfica realizada se definió que, el biogás es un combustible gaseoso producido a partir de biomásas húmedas mediante digestión anaerobia. El gas consiste básicamente en 55-70% de metano y 30-45% de dióxido de carbono. Los sustratos típicos incluyen estiércol, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTAR), residuos orgánicos industriales, residuos agrícolas y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.
2. Se realizó el estudio de los diferentes tipos de biodigestores existentes, las partes que lo componen, sus ventajas y desventajas, y, por consiguiente, se propuso el diseño del biodigestor en Hotel Pasacaballos.
3. Se realizó el estudio del biogás en el contexto internacional y su uso, el uso del biogás es variante, va desde emplearse como combustible para la cocina, calefacción, electricidad, combustible para los vehículos, hasta utilizarlo como el gas “principal” para ser procesado e introducido en gasoductos de gas natural. De igual modo, en el contexto nacional pues Cuba, cuenta, entre los sectores estatal y cooperativo-campesino, con mas de 4000 mil biodigestores, instalaciones donde se garantiza la digestión anaerobia para procesar y tratar excretas.

CAPÍTULO 2

Capítulo 2. Metodología para el dimensionamiento de un biodigestor.

2.1. Selección del tipo de biodigestor a utilizar

Para la selección del modelo de biodigestor más factible a construir en hotel Pasacaballos se tuvieron en cuenta las características de cada uno de los biodigestores estudiados en capítulo uno, tabla 1.9. Se realizó la comparación de los parámetros técnicos de dos tipos de biodigestores: **(Grover, 2017)**.

1. Biodigestor modelo chino o de cúpula fija.
2. Biodigestor modelo hindú o de campana flotante.

La comparación indica que el biodigestor que está más acorde con los parámetros requeridos (presión constante, manejo fácil y buena digestión en zonas tropicales), además de mejor aprovechamiento de las instalaciones civiles ya existentes en la planta de tratamiento residuales es el de **tipo hindú o campana flotante (Grover, 2017)**.

Basado en las conclusiones anteriores se presenta una metodología para el cálculo de las dimensiones de la campana flotante y la estimación de la generación de biogás mensual.

2.2. Preliminares para el diseño del biodigestor

2.2.1. Ubicación del área de estudio. Hotel Pasacaballos.

El hotel se encuentra ubicado a 25 km de la ciudad de Cienfuegos y a 80 km de la ciudad de Trinidad, ambas declaradas patrimonio cultural de la humanidad, y a 30 km del aeropuerto internacional Jaime González de Cienfuegos. Desde el hotel es muy fácil acceder a la playa de Rancho Luna, que se encuentra a solo 5 km y al delfinario, donde se puede disfrutar de un maravilloso espectáculo con animales marinos. Frente al hotel se encuentra la fortaleza de Nuestra Señora de los Ángeles de Jagua, que data de la época colonial, a la que se accede fácilmente por vía marítima desde la instalación. El hotel posee muelle propio, ofreciendo vía

directa a la admirada bahía cienfueguera. Además, se pueden realizar visitas a la comunidad vecina el perché, pueblo de pescadores que posee arraigadas tradiciones culturales.



Figura 2.1. Hotel Pasacaballos. Fuente: Elaboración propia.

2.2.2. Condiciones climáticas.

Cienfuegos tiene un clima tropical. En comparación con el invierno, los veranos tienen mucha más lluvia. En Cienfuegos, la temperatura media anual es de 25.2 °C. En un año, la precipitación es 1267 mm (climate-data.org, 2020).

Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 18 °C a 33 °C y rara vez baja a menos de 14°C o sube a más de 34 °C ([Spark, 2020](#)).

2.2.3. Información Habitacional del hotel Pasacaballo.

En la tabla 2.1 se muestra el numero de habitaciones y la capacidad del hotel.

Tabla 2.6. Habitaciones del Hotel Pasacaballos. Fuente: elaboración propia

Total, de Habitaciones	Dobles	Triples
188	152 (10 con camas matrimoniales)	36
Promedio de ocupación del hotel al año	410	
Otras áreas del hotel		
Capacidad		

Restaurante el Paisaje	198 comensales
Restaurante las golondrinas	100 comensales
Bar café	28 plazas
Snack bar piscina	-
Ranchón piscina	40 plazas
Sala de fiestas con un área para fumadores	130 y 50 plazas respectivamente
Tienda caracol	-
Centro de negocios	-
Club house	-
Cocina	-

Para el cálculo de la cantidad de excreta humana generada por día, se utilizará los datos del anexo .1 que es, producción de biogás según la especie animal.

2.3. Planta de tratamiento residuales.

2.3.1. Tanque Imhoff

El tanque Imhoff es un tipo de tanque de doble función-recepción y procesamiento para aguas residuales. Pueden verse tanques Imhoff en muchas formas, rectangulares y hasta circulares, pero siempre disponen de una cámara o cámaras superiores por las que pasan las aguas negras en su período de sedimentación, además de otra cámara inferior donde la materia recibida por gravedad permanece en condiciones tranquilas para su digestión anaeróbica (**Wikipedia, 2020**).

La principal ventaja de este tipo de tanque sobre el tanque séptico es que los lodos se separan del efluente, lo que permite una sedimentación y una digestión más completa. Cuando trabajan correctamente, estos sistemas son capaces de eliminar entre el 30 y 60 por ciento de la materia en suspensión, y entre el 25 y 40 por ciento de la DBO (Consortio de Aguas, 2020).

2.3.2. Diseño del tanque Imhoff

El tanque Imhoff consiste en una sección superior (cámara de sedimentación) y una sección inferior (cámara de digestión). Después de los procesos de pretratamiento, el agua entra en

la cámara (2), los sólidos se asientan en la cámara de sedimentación superior y descienden lentamente por un tabique inclinado (3) que finaliza en una pequeña sección abierta (4), a través de la cual pasa las materias decantadas a la cámara de digestión (5). Allí se acumulan y se digieren lentamente (Consortio de Aguas, 2020).

Gracias a su diseño, se impide que el gas y la escoria penetren en la cámara de sedimentación debido a las ranuras estrechas que impiden que las partículas de gas y lodo entren en la cámara de sedimentación (Consortio de Aguas, 2020).

En la cámara de digestión (5) se producen reacciones anaerobias, es decir sin la intervención del oxígeno. Los fangos se depositan en la parte baja de ésta cámara, donde permanecen hasta ser retirados periódicamente para su posterior tratamiento y secado. El agua sale a través de las distintas salidas y pasa al siguiente punto del tratamiento.

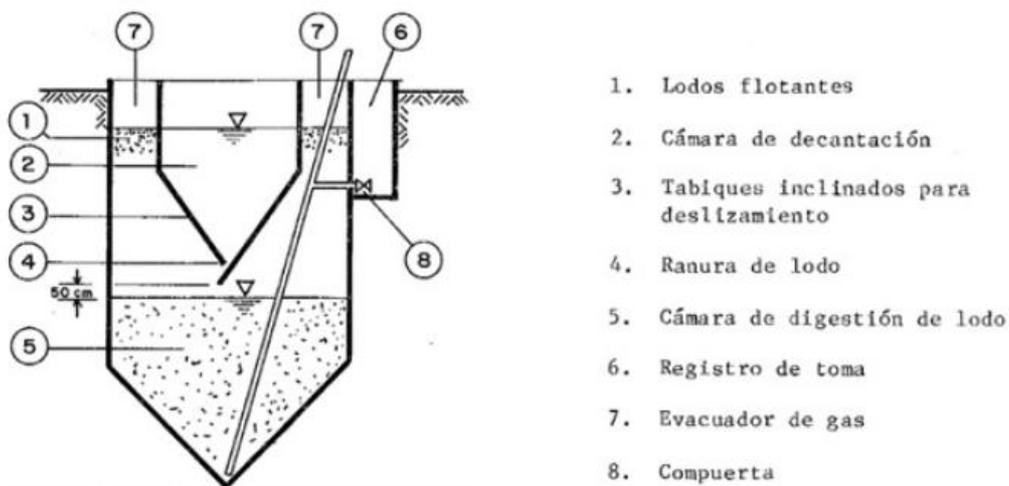


Figura 3.2 Diseño de tanque Imhoff. Fuente: <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/tanque-imhoff-historia-y-principio-de-funcionamiento>.

2.3.3. Aplicaciones y ventajas

El tanque de Imhoff se utilizó en pequeñas y grandes instalaciones de tratamiento de aguas residuales a principios y mediados de 1900.

La desaparición del tanque Imhoff como elemento único de depuración se debió a los elevados costes de construcción y a la imposibilidad de cumplir con los requisitos de rendimiento actuales. Los procesos de tratamiento combinados en un solo recipiente no

podrían competir con los métodos actuales, más intensivos con procesos de tratamiento individuales.

Desde una perspectiva de proceso, se experimentaron dificultades operacionales como resultado de una digestión de lodos incompleta, formación de biogás y natas y formación excesiva de escoria.

Sus principales ventajas son las siguientes:

- Requiere poco de espacio
- Es simple, ya que no tiene partes móviles
- Requiere poco tiempo de operación (la remoción de lodos es periódica)

Basado en la definición anterior, sobre el tanque Imhoff, resulta importante explicar lo siguiente con respecto al tanque Imhoff del hotel Pasacaballos:

2.4. Características de las aguas del hotel pasacaballos. Tratamiento.

De acuerdo a las características de la planta del hotel pasacaballos, las aguas albañales tiene una clasificación combinada de aguas residuales domésticas, sanitarios y pluviales. Desde el punto de vista de tratamiento, se prevé la construcción de un tanque en el área del estudio de la implementación del biodigestor. Con el fin de tratar el agua a partir de una pastilla de cloro, que tiene el objetivo de clorar el agua que pudiera ser reutilizada, pero se le hecha en el mar.

A partir del sistema de drenaje de hotel, pasa el agua residual de todos los servicios realizados hasta que lleguen en el tanque Imhoff. Este sistema está compuesto por dos canales hechas de rejillas sistema este responsable por evitar el paso de los mantos solidos. Desde allí, el mismo sistema contiene aperturas donde quedan los residuos y se retiran con palas, facilitando así su limpieza figura 2.3, el mismo sistema de drenaje da el acceso al

tanque Inof principal tanque entre los tres del almacenaje de aguas albañales (**Información obtenida en la Intitucion, 2020**).



Figura 2.3 Sistema de drenaje del Hotel Pasacaballos.

Fuente: (Información obtenida en la Intitucion, 2020)

El tanque Imhoff está hecho de cemento para almacenar las aguas albañales y por así distribuirlos a los tanques secundarios, está compuesto por columnas rectas hacia el subterráneo con una profundidad de 4 m, 9.55 m de largo y 5.40 m de ancho en un área de 49.83 m². Con canales que permiten el agua circular que va llenando el tanque, permitiendo así absolver los mantos solidos y dejando la libre circulación de las aguas albañales; con el fin de separar las aguas con mayores desechos a menor desecho o sea las sucias de las limpias. Consecuentemente, el agua sin residuos sale a partir de una tubería instalada desde tanque principal llevando hacia los tanques secundarios figura 2.4.



Figura 2.4 Foto del área de almacenaje de las aguas albañales, tanque Imhoff en azul. Fuente: (Información obtenida en la Intitucion, 2020)

A cada 6 meses se hace la limpieza del tanque, con carro de fosa o también, el tanque tiene un sistema de limpieza manual compuesta por válvulas de las cuales se abre y el sólido duro que se queda en el tanque es sacado con la pala. El tanque está diseñado para una capacidad volumétrica de almacenamiento de todas las aguas albañales, sin embargo, la parte externa del mismo hay otra capacidad volumétrica con el fin de drenar todo sólido que viene de la parte principal del tanque (Infografía 2.5 **(Información obtenida en la Intitucion, 2020)**).



Figura 2.5 Foto la parte exterior del tanque para el drenaje de sólidos. Fuente: (Información obtenida en la Intitucion, 2020)

El agua que sale del tanque, va en los dos tanques auxiliares conectados por tuberías, dentro de los tanques hay dos aireadores cada uno de ellos que posee 4 motores automáticos permitiendo que funcionan serpentines de aire que van girando liberando oxígeno, permitiendo que las bacterias provenientes de las aguas albañales del tanque principal no se mueran por completo, según el manual del fabricante del manual de los aireadores. Desde allí las bacterias van descomponiéndose y decantándose hacia el otro tanque que está conectado a los aireadores; en seguida, ocurre el proceso de decantación, en el mismo tanque esta instalado una bomba que hala el fango y lo hace circular en un proceso cíclico biológico hacia el tanque principal **(Información obtenida en la Intitucion, 2020)**.

Por tanto; cuando pasa de la penúltima etapa para la última hay un borde de la parte externa o fuera del tanque que tiene una pastilla de cloro, que tiene el objetivo de clorar el agua que pudiera ser reutilizada, pero se le esparce en el mar **(Información obtenida en la Intitucion, 2020)**.



Figura 2.6 Foto. Los dos tanques axilares y el tanque donde ocurre la decantación. Fuente: (Información obtenida en la Intitucion, 2020)

2.5. Metodología para el cálculo de parámetros y dimensiones del biodigestor de campana flotante.

2.5.1. Producción de excreta por especies

Para conocer la producción de estiércol generada por las ovejas y vacas durante un día, utilizamos las fórmulas que se indican a continuación (Grover, 2017).

2.5.1.1. Ovinos

Ecuación 2.1

$$Peo = \frac{\sum Eo}{Ndp}$$

Donde:

Peo = promedio total de excretas de ovejas (kg de excreta/día)

$\sum Eo$ = sumatoria de excreta de ovejas kg.

Ndp = números días pesados

Ecuación 2.2

$$Pda = \frac{Peo}{Nc}$$

Donde:

Pda = promedio diario de excreta por animal (kg de excreta/día)

Peo = promedio total de excreta de ovejas

Nc = número de cabeza.

Vacas.

Ecuación 2.3

$$Peb = \frac{\sum Eb}{Ndp}$$

Donde:

Peb = promedio total de excretas de buey (kg de excreta/día)

$\sum Eb$ = sumatoria de excreta de bueyes kg

Ndp = números días pesados

Ecuación 2.4

$$Pda = \frac{Peb}{Nc}$$

Donde:

Pda = promedio diario de excreta por animal (kg excreto/día)

Peb = promedio total de excreta de bueyes.

Nc = numero de cabezas

2.5.1.2. Cerdos

Los cerdos tienen un tiempo de estación de 24 horas por día, mientras que las ovejas y vacas tienen una estación de 12 horas como promedio en el establo, por lo que la cantidad de excreta a recoger estará afectada por este tiempo de estación. Entonces la producción total a recoger será establecida en relación al tamaño del animal, para lo cual se vale la tabla 2.2.

Tabla 7.2 Cantidad de excreta de cerdos según tamaño. Fuente: (Grover, 2017)

Tamaño de cerdo	Cantidad de excreta por (kg)
Grande	2
Mediano	1.5
pequeño	1

Con los datos obtenidos en la tabla se procede a calcular el potencial de los cerdos para lo cual se utiliza las siguientes fórmulas:

Ecuación 2.5

$$Pcp = Ncp \times Cep$$

Donde:

Pcp = potencial de cerdos pequeños (kg de excreta/día)

Ncp = numero de cerdos pequeños

Cep = cantidad de excreta por día de cerdos pequeños (kg)

Ecuación 2. 6

$$Pcm = Ncm \times Cem$$

Donde:

Pcm = potencial de cerdos medianos (kg de excreta/día)

Ncm = numero de cerdos medianos

Cem = cantidad de excreta por día de cerdos medianos (kg)

Ecuación 2.7

$$Pcg = Ncg \times Ceg$$

Donde:

Pcg = potencial de cerdos grandes (kg de excreta/día)

Ncg = numero de cerdos grandes

Ceg = cantidad de excreta por día de cerdos grandes (kg)

2.5.1.3. Potencial de biomasa

Para obtener el potencial total de la biomasa producida por los animales a diario en la finca se aplica la siguiente fórmula:

Ecuación 2.8

$$PB = Pec + Peo + Peb$$

Donde:

PB = potencial de biomasa (kg excreto/día)

Pec = Potencial total de excreta de cerdos

Peo = promedio total de excreta de ovejas

Peb = promedio total de excreta de bueyes.

2.5.1.4. Agua necesaria

La siguiente fórmula permite conocer la cantidad de agua que debemos colocar en la biomasa existente para obtener un desarrollo apropiado de las bacterias que producen el metano.

Ecuación 2.9

$$An = 3 \times PB$$

Donde:

A_n = agua necesaria (kg de agua/ kg de excreta)

P_b = potencial de biomasa.

Con esta cantidad de agua se forma la totalidad de la biomasa a degradar

2.5.1.5. Biomasa disponible

Para el tratamiento se recomienda emplear un metro cúbico de capacidad en el biodigestor por cada 1000 kg de biomasa, pues se considera aquí que la biomasa formada en sus tres cuartas partes está constituida por agua y posee una densidad equivalente a la de ésta.

Ecuación 2.10

$$BD = PB + A_n$$

Donde:

BD = biomasa disponible (kg/día)

PB = potencial de biomasa

A_n = agua necesaria.

Volumen diario de biomasa

Ecuación 2.11

$$V_{BM} = \frac{BD}{1000}$$

Donde:

V_{BM} = volumen diario de biomasa (m³/día)

BD = biomasa disponible

2.6. Dimensionamiento de un biodigestor tipo hindú

El principal objetivo del diseño de un biodigestor es alcanzar un alto contenido de biomasa dentro del mismo que permita una alta producción de biogás y una alta reducción de la materia orgánica por unidad de volumen del biodigestor. Antes de comenzar la construcción de cualquier modelo, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones **(Grover, 2017)**:

- La instalación y mantenimiento debe ser socialmente aconsejable, técnicamente posible y económicamente justificable.
- El biogás sustituirá parte del GLP que se consume en el hotel para la cocción de alimentos, el carbón o algún derivado del petróleo y la digestión contribuirá a reducir la polución, proveyendo además un biofertilizante.
- El modelo elegido debe ser el conveniente para las condiciones climáticas locales.
- El proyecto debe ser elaborado aprovechando las instalaciones existentes en la planta del tratamiento residuales del hotel.
- Las consideraciones dependientes del tamaño para el diseño de la campana dependen del volumen del biogás generado y de las dimensiones del tanque Inof

La metodología de cálculo para el dimensionamiento del biodigestor que se utilizará es la propuesta por la compañía brasileña CEMIG tomado del folleto titulado “instalación y dimensionamiento de un biodigestor hindú” **(Grover, 2017)**.

Un biodigestor modelo hindú está compuesto básicamente de:

- sistema de entrada de material a ser digerido
- cámara de digestión
- sistema de descarga del efluente
- depósito de gas

2.6.1. Tiempo de retención de la biomasa

Es el lapso durante el cual el material de fermentación permanece en el biodigestor.

Bajo la acción de bacterias mesofílicas se estima que en un reactor normal a (30 – 35 °C) el tiempo requerido para biodegradar la materia prima alimentada es de 20 días, tiempo que se puede afectar por las variaciones de la temperatura ambiental.

Ecuación 2.12

$$TR = 20 \text{ dias} \times 1.3$$

El factor 1,3 es un coeficiente que depende de la temperatura, la cual, para garantizar un funcionamiento óptimo del biodigestor para cualquier época del año, se ha asumido como (30 – 35 °C.)

2.6.2. Volumen de digestión de la biomasa

El tamaño del biodigestor está determinado por el tiempo de retención y por la cantidad diaria de sedimento de fermentación. La cantidad de sedimento de fermentación se compone del material de fermentación y del agua de mezcla.

El volumen de digestión de la biomasa se obtiene mediante la siguiente expresión.

Ecuación 2.13

$$V_D = V_{BM} \times TR$$

Donde:

V_D = volumen de digestión de biomasa m^3

V_{BM} = volumen diario de biomasa.

T_R = tiempo de retención de la biomasa.

2.6.3. Volumen de producción diaria de biogás

El tamaño del depósito de gas depende de la producción de gas y de la cantidad de gas que se utilice. La producción de gas depende de la cantidad y de propiedades del material de fermentación, de la temperatura del digestor y del tiempo de retención ver anexo 1.

Ecuación 2.14

$$V_G = (Pec \times Rbc) + (Peo \times Rbo) + (Peb \times Rbb)$$

Donde:

V_G = volumen de producción de biogás; (m³)

Pec = potencial de excreta de cerdos

Rbc = rendimiento de biogás de cerdos; (m³/kg)

Peo = promedio total de estiércol de ovejas

Rbo = rendimiento de biogás de las ovejas; (m³/kg)

Peb = promedio total de estiércol de bueyes

Rbb = rendimiento de biogás de ovejas; (m³/kg)

2.6.4. Volumen total del biodigestor

Con los dos volúmenes se puede determinar el volumen total del biodigestor.

Ecuación 2.15

$$V_{BD} = V_D + V_G$$

Donde:

V_{BD} = volumen total del biodigestor (m³)

V_D = volumen de digestión de biomasa

V_G = volumen de almacenamiento de gas

2.6.5. Diámetro y altura útil

Conociendo el volumen del biodigestor, se debe determinar su diámetro y altura, cumpliéndose la relación siguiente:

Ecuación 2.16

$$0.66 \leq \frac{Du}{Hu} \leq 1$$

Para obtener estos valores se utiliza la fórmula de volumen de un cilindro:

Ecuación 2.17

$$Vu = \frac{\pi \times Du^2}{4} \times Hu; \quad Hu = \frac{4 \times Vu}{Du^2 \times \pi}$$

Donde:

Hu = altura útil del cilindro, que equivale la altura del biodigestor; (m)

Vu = volumen útil del cilindro, que equivale al volumen del biodigestor; (m³)

Du = diámetro útil del cilindro, que equivale a diámetro interno del biodigestor; (m)

Nota: el volumen útil es el volumen ocupado por la materia orgánica a ser digerida, exceptuándose el volumen relativo al biogás entonces

Ecuación 2.18

$$Hcrd = Hu + P + 0.15$$

Donde:

Hrcd = altura real de la cámara de digestión; (m)

Hu = altura útil del cilindro;(m)

P = presión de columna de agua (altura manométrica)

0.15 = holgura

Nota: en los digestores del modelo hindú la presión está fijada en 0.15 m. Se aconseja diseñar los equipos para que trabajen con esta presión.

2.6.7. Dimensionamiento de la cámara de carga

La cámara está compuesta por un tubo derecho que se coloca en forma oblicua, lo que facilita su construcción, ahorra mano de obra y materiales, asegura una entrada libre y facilita la agitación del líquido.

La cámara de carga deberá de situarse por lo menos 30 cm más elevado que el nivel del material dentro de la cámara de digestión.

Estas dimensiones pueden ser determinadas por la fórmula siguiente

Ecuación 2.19

$$V_{cc} = L_{cc} \times C_{cc} \times H_{cc}$$

Donde:

V_{cc} = volumen de la cámara de carga; (m³)

L_{cc} = largo de la cámara de carga; (m)

C_{cc} = ancho de la cámara de carga; (m)

H_{cc} = altura de la cámara de carga; (m). Esta debe ser superior a 1 m.

2.6.8. Dimensionamiento de la cámara de descarga

La cámara de descarga es por donde se evacuan los materiales de fermentación. El biogás producido en el biodigestor presiona el líquido fermentado hacia una pileta de salida para un almacenamiento, la pileta de salida también se llama cámara hidráulica o de hidropresión. Las dimensiones son establecidas mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 2.20

$$V_{cd} = L_{cd} \times C_{cd} \times H_{cd}$$

Donde:

V_{cd} = volumen de cámara de descarga; (m^3)

L_{cd} = largo de la cámara de descarga; (m)

C_{cd} = ancho de la cámara de descarga; (m)

H_{cd} = altura de la cámara de descarga. Esta debe estar debajo del nivel del suelo.

2.6.9. Dimensionamiento del gasómetro

Es muy conveniente usarlo ya que garantiza presiones estables ó constantes de trabajo le confiere al sistema una mayor autonomía en lo referente al almacenamiento de gas a baja presión y el gas no necesita tratamientos especiales; pueden estar contruidos de concreto reforzado, de mampostería, de metal, de fibra de vidrio o de plástico, la forma puede ser circular o cuadrado. El peso de la cubierta flotante del gasómetro mantiene la presión necesaria del gas, presión que varia entre 0,05-0,2 m de columna de agua, ésta cubierta se mueve hacia arriba o hacia abajo de acuerdo a la cantidad de gas que reciba del digestor; la forma más conveniente es la circular.

Para la construcción del gasómetro debe preverse un volumen mínimo equivalente a una producción de biogás de 12 horas. Las dimensiones que se deben acotar aquí son su diámetro y su volumen, estas se calculan con las siguientes formulas:

Ecuación 2.21

$$D_{ig} = D_i - 0.10 m$$

Donde:

D_{ig} = diámetro inferior del gasómetro; (m)

D_i = diámetro interno del biodigestor (parte superior = $d_u + 0.10 m$)

0.10 = holgura.

Nota: la parte superior del biodigestor debe tener 10 cm de más para formar un muro de apoyo para el gasómetro.

Ecuación 2.22

$$sg = Di + 0.10 m$$

Donde:

Dsg = diámetro superior del gasómetro; (m).

Di = diámetro interno del biodigestor (parte superior= du+0.10 m)

0.10 m holgura.

Ecuación 2.23

$$Vg = \frac{\pi \times Dg^2}{4} \times Hg$$

Donde:

Vg = volumen del gasómetro; (m³). Igual a producción diaria de biogás V_g

Dg = diámetro del gasómetro; (m)

Hg = altura del gasómetro; (m) incógnita a determinar. Luego de determinarse la altura del gasómetro, se procede a calcular la altura del mismo mediante la formula:

Ecuación 2.24

$$Hrg = Hg + P + 0.10$$

Donde:

Hrg = altura real del gasómetro;(m)

Hg = altura del gasómetro;(m)

P = presión. (fijada 0.15 mca)

0.10 holgura.

2.6.10. Dimensionamiento de la pared divisora

La pared divisoria divide el cilindro del biodigestor en dos cámaras de radios iguales, para calcular sus dimensiones se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 2.25

$$H_{pd} = H_{rcd} - H_{rg}$$

Donde:

H_{pd} = altura de la pared divisoria;(m)

H_{rcd} = altura real de la cámara de digestión;(m)

H_{rg} = altura real del gasómetro;(m)

2.6.11. Dimensionamiento del caño guía.

Cumple la función de orientar el movimiento vertical del gasómetro. Este puede determinarse por la formula.

Ecuación 2.26

$$C_g = 1 + H_{rg} + \frac{H_{rg}}{2}$$

Donde:

C_g = longitud del caño guía; (m)

1= cantidad de caños que deberán ser colocados en la pared divisoria

H_{rg} = altura real del gasómetro que corresponde con la distancia de la pared divisoria a la superficie.

$H_{rg}/2$ = parámetro que busca mantener la estabilidad del gasómetro cuando este se encuentra a su máxima capacidad.

Conclusiones parciales del capítulo 2.

1. El estudio detallado de la planta de tratamiento residual del hotel arrojó que es factible el aprovechamiento de las aguas albañales para la generación de biogás
2. El tipo de biodigestor que más se adecua para las características civiles de la planta residual es el de campana flotante.
3. La metodología aplicada para el cálculo del dimensionamiento del biodigestor que se utilizó es la propuesta por la compañía brasileña CEMIG el cual es más viable.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3. Análisis de resultado

3.1. Introducción

En el capítulo tres se presentará el análisis de resultados de los cálculos de producción de excreta humana, en el hotel Pasacaballos, el volumen total de la campana flotante del tanque Imhoff a partir de la metodología mostrada en el capítulo dos.

3.2. Producción de excreta humana por día

Utilizando los datos del anexo 1 de la producción de excreta humana diaria (0,40 kg), se procede al cálculo de la producción de excreta humana generada por el hotel con el promedio de 410 personas diarias como huéspedes y 95 trabajadores, tabla 2.1.

Producción de cantidad de excreta humana por día en las 188 habitaciones que corresponde a un total de 410. Para conocer la producción de excreta humana que genera en las 188 habitaciones del edificio se realizará con la siguiente fórmula:

$$Peh = Nh \times Cep \left(\frac{\text{kg}}{\text{día}} \right)$$

$$Peh = 410 \times 0.40 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$Peh = 164 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

Peh = producción de excreta humana del hotel; (kg)

Nh = numero de huéspedes promedio por día

Cep = cantidad de excreta humana por día; (0.40 kg)

$$Peth = Nh \times Cep \left(\frac{\text{kg}}{\text{día}} \right)$$

$$Peth = 95 \times 0.40 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$P_{eth} = 38 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

P_{eth} = producción de excreta humana de trabajadores del hotel

N_{th} = número de trabajadores que permanecen el hotel por día

C_{ep} = cantidad de excreta humana por día; (0.40 kg)

Producción de cantidad de excreta humana por día del hotel Pasacaballos (**P T**)

$$PT = P_{eh} + P_{eth} \left(\frac{\text{kg}}{\text{día}} \right)$$

$$PT = (164 + 38) \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$PT = 202 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

En la tabla 3.1 muestra se muestra un resumen de la producción de excreta humana por día del hotel Pasacaballos.

Tabla 3.8 Producción de excreta humana por día en el Hotel. Fuente: elaboración propia.

Habitaciones (huéspedes) y Trabajadores	Número de habitantes	Cantidad de excreta humana por día (kg)	Excreta humana por día (kg)
Dobles y triples	410	0.40	164
Trabajadores	95	0.40	38
Total	505	0.8	202

3.2.1. Potencial de biomasa

$$PT = PB \left(\frac{\text{kg}}{\text{dia}} \right)$$

$$PB = 202 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}$$

3.2.2. Agua Necesaria.

El tanque Imhoff opera como una trampa para todos los solidos en las aguas albañales del hotel. La proporción de agua y solidos es variable durante todo el día, dependiendo de la actividad predominante a cada hora.

El exceso de agua, pasa por gravedad a otros tanques donde es filtrada varias veces antes de ser vertida al mar.

3.2.3 Volumen diario de biomasa.

$$V_{BM} = \frac{BD}{1000} (m^3)$$

$$V_{BM} = \frac{202}{1000} m^3$$

$$V_{BM} = 0.202 m^3$$

Es necesario transformar las unidades de la biomasa disponible en (m³/día) debido a que el volumen del biodigestor está dado en m³.

3.2.4. Tiempo de Retención de la Biomasa.

$$TR = 20 \text{ dias} \times 1.3$$

$$TR = 26 \text{ dias}$$

3.2.5. Volumen de digestión de biomasa

$$V_D = V_{BM} \left(\frac{m^3}{días} \right) \times TR \text{ (días)}$$

$$V_D = 0.202 \left(\frac{m^3}{días} \right) \times 26 \text{ días}$$

$$V_D = 5.252 \text{ m}^3$$

3.2.6. Volumen de almacenamiento del gas

$$V_G = PB \times RB_h \text{ (m}^3\text{)}$$

$$V_G = 202 \times 0.07 \text{ m}^3$$

$$V_G = 14.14 \text{ m}^3$$

3.2.7. Volumen total del biodigestor

$$V_{BD} = V_D + V_G \text{ (m}^3\text{)}$$

$$V_{BD} = 5.252 + 14.14 \text{ m}^3$$

$$V_{BD} = 19.392 \text{ m}^3$$

Después de los cálculos realizados el volumen total del biodigestor es 19.392 m³ esto implica que, debido a su tamaño se procederá el calculo de la cúpula flotante.

3.2.7. Volumen total de la campana flotante del tanque Imhoff.

Es necesario aclarar que el tanque para el diseño propuesto tiene la forma rectangular por lo que, se considerara el volumen partiendo del área del rectángulo que es el tanque Inof. Se tomaron las medidas reales del tanque Inof para encontrar el volumen total de la campana flotante con la siguiente expresión:

$$V_{\text{tanq}} = L_{\text{real}} \times A_{\text{real}} \times H_{\text{real}}$$

L_{real} = largo del tanque Imhoff; (m)

A_{real} = ancho del tanque Imhoff; (m)

$H_{real} = V_{campana}$ = altura del tanque Imhoff; (m)

Para calcular el volumen de la campana es necesario el volumen del tanque Imhoff, por lo que la ecuación siguiente queda de la siguiente forma:

$$V_{BD} = L \times A \times H(m)$$

$$V_c = \frac{V_{BD}}{L \times A} (m)$$

$$V_c = \frac{19.132}{51.57}$$

$$V_c = 0.370 \text{ m}$$

Conclusiones parciales del capítulo 3.

1. Los datos obtenidos en el hotel Pasacaballos, permitieron determinar que existe un potencial de excreta humana para obtener un total de biomasa de 202 kg/día que sirve para diseñar una campana flotante para el tanque Imhoff en el hotel Pasacaballos.
2. Se determinó que el volumen de almacenamiento de gas es de 14.14 m³ por lo que ayudara el hotel en el ahorro del GLP cuando se va a utilizar en la cocción de alimentos del mismo
3. Se determinó que el volumen total de la planta es de 19.392 m³ teniendo en cuenta la mezcla sólidos más agua. Sabiendo que la planta puede contar con una campana flotante de 9.55 x 5.40 x 0.370 m para la digestión anaeróbica.
4. La regulación de la presión del gas se consigue colocando contrapeso encima de la campana flotante; y en la medida que se coloque más peso mayor será la presión del biogás. La campana flotante siempre debe tener una parte de ella que esté sumergida dentro de la mezcla del lodo para evitar la fuga del biogás.
5. La altura total de la campana dependerá del tipo de material que se utilice para su construcción y nunca podrá ser menor de 0.370 m.

Conclusiones Generales.

1. De la revisión bibliográfica realizada se definió que, el biogás es un combustible gaseoso producido a partir de biomásas húmedas mediante digestión anaerobia. El gas consiste básicamente en 55-70% de metano y 30-45% de dióxido de carbono. Los sustratos típicos incluyen estiércol, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTAR), residuos orgánicos industriales, residuos agrícolas y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Se realizó el estudio de diferentes tipos de biodigestores existentes, sus ventajas y desventajas de igual manera se propuso el diseño de biodigestor en hotel Pasacaballos.
2. El estudio detallado de la planta de tratamiento de aguas residuales del hotel arrojó que es factible el aprovechamiento de las aguas albañales para la generación de biogás. Por lo que el tipo de biodigestor que más se adecua para las características civiles de la planta residual es el de campana flotante, entretanto, el diseño del biodigestor fue posible, utilizando los residuos albañales del hotel Pasacaballos a partir de la metodología utilizada para el calculo del dimensionamiento del biodigestor propuesta por compañía brasileña CEMIG.
3. Se determino que existe un potencial de excreta humana para obtener un total de biomasa de 202 kg/día que sirve para diseñar una campana flotante para el tanque Imhoff en el hotel Pasacaballos. En efecto, la capacidad total de la Planta es de 19.392 m³ teniendo en cuenta la mezcla sólidos más agua. Sabiendo que la planta puede contar con una campana flotante de 9.55 x 5.40 x 0.370 m para la digestión anaeróbica; pues la regulación de la presión del gas se consigue colocando contrapeso encima de la campana flotante; Por lo tanto, la altura total de la campana dependerá del tipo de material que se utilice para su construcción y nunca podrá ser menor de 0.370 m.

Recomendaciones.

1. Realizar un estudio de los componentes físico químico de la mezcla del lodo existente en del tanque Imhoff.
2. Colocar una campana pequeña para medir la producción de biogás por área en el tanque Imhoff.
3. Colocar una estructura techada encima del tanque Imhoff para disminuir los cambios de temperatura entre la noche y el día ya que estos afectan los microorganismos que producen el biogás.
4. Analizar el estudio de factibilidad económica al implementar el biodigestor de cúpula flotante.

Bibliografía

- UNAM. (2018). *Biogás en Mexico. Lecciones aprendidas de los proyectos de cooperacion 2018-2019. Informe cooperativo, lúster biocombustibles gaseosos*, ib tech, Danish energy agency; Intituto de Ingenieria., lúster biocombustibles gaseosos, ib tech, Danish energy agency; Intituto de Ingenieria., Mexico y Dinamarca.
- Barrena, & Maicelo, G. (2010). «Producción de biogás en laboratorio a partir de residuos domésticos y ganaderos y su escalamiento». *Revista aporte santiaguino*, n.o 1, .
- López, J. H. (2014). *Diseño de un sistema para el aprovechamiento energético de biogás a partir de los residuos generados por el ganado vacuno en la vaquería 101 perteneciente a la empresa pecuaria “Camilo Cienfuegos”* (Pinar del Río, Cuba). Tesis de pregrado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Pinar del Rio, Cuba.
- Becerra, C. A. (2017). *Los biodigestores: fuente de desarrollo sostenible y calidad de vida en comunidades rurales de Colombia*. Trabajo de grado , Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Facultad de Ingenieria Geográfica y Ambiental, Bogotá
- Rodrigo, J. C. (2008). *El consumo de energía y el medio ambiente en la vivienda en España. Un análisis de ciclo de vida (acv)*. Madrid, España: editorial fundación gas natural.
- Loera, T.A. C. (2016). *Reporte de inteligencia tecnológica biocombustibles gaseosos. Secretaria de energía México(SENER), Instituto Mexicano del Petroleo(IMP) y Fondo de Sostentabilidad Energetica, f.61493. Mapas de ruta tecnológica para los centros mexicanos de innovación en energía (cemié's)*. Ciudad de Mexico.
- SENER. (2014). *Programa especial para el aprovechamiento de energías renovables. Secretaria de energía de Mexico*, ciudad de Mexico.
- Romero, G. M. (2017). *Qué es el biogás*. Aqualimpia engineering e.k. uelzen – niendorfer str. 53 b: aqualimpia engineering e.k.
- FAO. (2011). *Manual de biogas*. Ministerio de energía • Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo • Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura • global environment facility, MINERGIA / PNUD / FAO /Santiago de Chile: proyecto chi/00/g32.

- Martin, A. (2016). *Alternativas para generación de energía eléctrica a partir de biogás procedente de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos*. Universidad de Valladolid.
- Garcia, G. D. (2012). *Biogas: Una alternativa ecológica para la producción de energía*. Ideas, 85.
- Mckeown, R. S. (2009).
- Medel, J. A. (2010). *Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros*. Tesis de pregrado, Universidad de Chile facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Mecánica, Santiago de Chile.
- Chen, Y. C. (2008). *Inhibition of anaerobic digestion process: a review*. *Bioresource technology*.
- Kalia, V. P. (2008). *Microbial diversity and genomics in aid of bioenergy*. *Journal of industrial microbiology and biotechnology*.
- Alvarez, M. (2008). *Obtenido de inspiración por un mundo libre de pobreza. Obtenido de contaminación del agua*: Recuperado de <https://www.inspiration.org/cambio-climatico/contaminacion/contaminacion-del-agua>
- Diaz, A. (2008). *Tratamiento de aguas residuales*.
- Galarza, G. E. (2016). *Diseño de un biodigestor para el mejoramiento de las aguas residuales en la parroquia de Tumbaco ejemplificado en los barrios Tola Chica, Tola Grande y Santa Rosa*. Tesis de pregrado, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Colegio de Ciencias e Ingenierías, Quito, Ecuador.
- Defra. (2010). *Anaerobic. Obtenido de digestion*". Recuperado de: <http://www.biogas-info-co.uk/ind,ex.php/localgovernment>.
- Mae-wan, H. (2008). *"Biogas bonanza for third world development. Institute of Science in Society"*. Recuperado de: <http://www.i-sis.org.uk/biogasbonanza.php>
- Boyle, G. E. (2004). *Renewable energy*. Nueva York: second edition. Oxford University Press.

- Ortega, S. P. (2013). *“Energía del biogas: una opción sustentable para el medio rural y semiurbano “*. Tesis de pregrado, Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Xalapa.
- Martin, G. (2017). *Diseño y construcción de biodigestores industriales en Cuba aqua limpia*.
- Coimbra-Araujo, C. H. (2014). *Brazilian case study for biogas energy: production of electric power, heat and automotive energy in condominiums of agroenergy*. Renewab.
- Grover, C. T. (2017). *Diseño de un bioreactor para generar biogás a partir de desechos orgánicos de animales en la irrigación de Majes - Caylloma* . Tesis de pregrado. Universidad Nacional de San Agustín, Facultad de Ingeniería de Procesos, Arequipa, Perú.
- Fernández, P. S. (2019). *Webmaster*. Recuperado de: www.miguantanamo.gob.cu/es/nuestra-region
- Opcines. (2015). *Semanario economico y financierode Cuba*. Recuperado de <http://www.opciones.cu/cuba/2015-07-12/discreta-ejecucion-del-presupuesto-a-mitad-de-2015/>
- Encuentro Cuba*. (2008). Recuperado de <http://www.granma.cu/granmad/2008/11/28/nacional/artic31.html>
- Redbiolac . (2019). *Estudio de caso, articulos originales y capsulas educativas en temas relacionados en digestion anaerobica en latinoamerica e el caribe*. Revista Redbiolac. Volumen 10 pp.pp 10-11.
- Varnero, M. T. (2011). *Manual de biogas*. Santiago de Chile, Chile.
- Climate-data.org*. (2020). Recuperado de <https://es.climate-data.org/america-del-norte/cuba/cienfuegos/cienfuegos-3199/>
- Spark, W.* (2020). Recuperado de <https://es.weatherspark.com/y/18562/clima-promedio-en-cienfuegos-cuba-durante-todo-el-a%c3%b1o>
- Wikipedia. (2020). Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/tanque_imhoff
- Consortio de aguas. (2020). *Consortio para el abastecimiento de aguas y saneamiento en el Principado de Asturias*. Recuperado de

<https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/tanque-imhoff-historia-y-principio-de-funcionamiento>

Información obtenida en la intuición. (2020). Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba.

(2020). Recuperado de https://www.google.com/search?q=que+es+tanque+imhoff?&client=firefox-b-d&sxsrf=alekk014fr5ypq4ep0mxhpkk_uhn3ibew:1593196445811&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=jti4lwf99hai_m%252clge2zrwshrirm%252c%252fm%252f016jjh&vet=1&usg=ai4_-kqrf0gczahzgc5d8uunihkygy2

Anexos. 1. Tabla de rendimiento de biogas según la especie animal.

Espece Animal	Cantidad de excreta por día (kg)	Rendimiento de biogás (m ³ /kg excreta)	Producción de biogás (m ³ /animal.día)	Relación excreta-agua
Vacuno				
- Grande	15	0.04	0.60	1.01
- Mediano	10	0.04	0.40	
- Pequeño	8	0.04	0.32	
- Ternero	4	0.04	0.16	
Cerdo				
- Grande	2.0	0.07	0.14	1:1 a 1:3
- Mediano	1.5	0.07	0.10	
- Pequeño	1.0	0.07	0.07	
Avícola				
- Grande	0.15	0.06	0.009	1.03
- Mediano	0.10	0.06	0.006	
- Pequeño	0.05	0.06	0.003	
Ovino				
- Grande	5.0	0.05	0.25	1:2 a 2:3
- Mediano	2.0	0.05	0.10	
- Pequeño	1.0	0.05	0.05	
Pato	0.15	0.05	0.008	1:2 a 2:3
Paloma	0.05	0.05	0.003	1:2 a 2:3
Caballo	15.0	0.04	0.60	1:2 a 2:3
Camello	20.0	0.03	0.60	1:2 a 2:3
Elefante	40.0	0.02	0.80	1:2 a 2:3
Humanos				
- Adulto	0.40	0.07	0.028	1:2 a 2:3
- Niños	0.20	0.07	0.014	

Fuente: (Grover, 2017)

Anexo. 2. La contruccion civil. Tanque Imhoff.



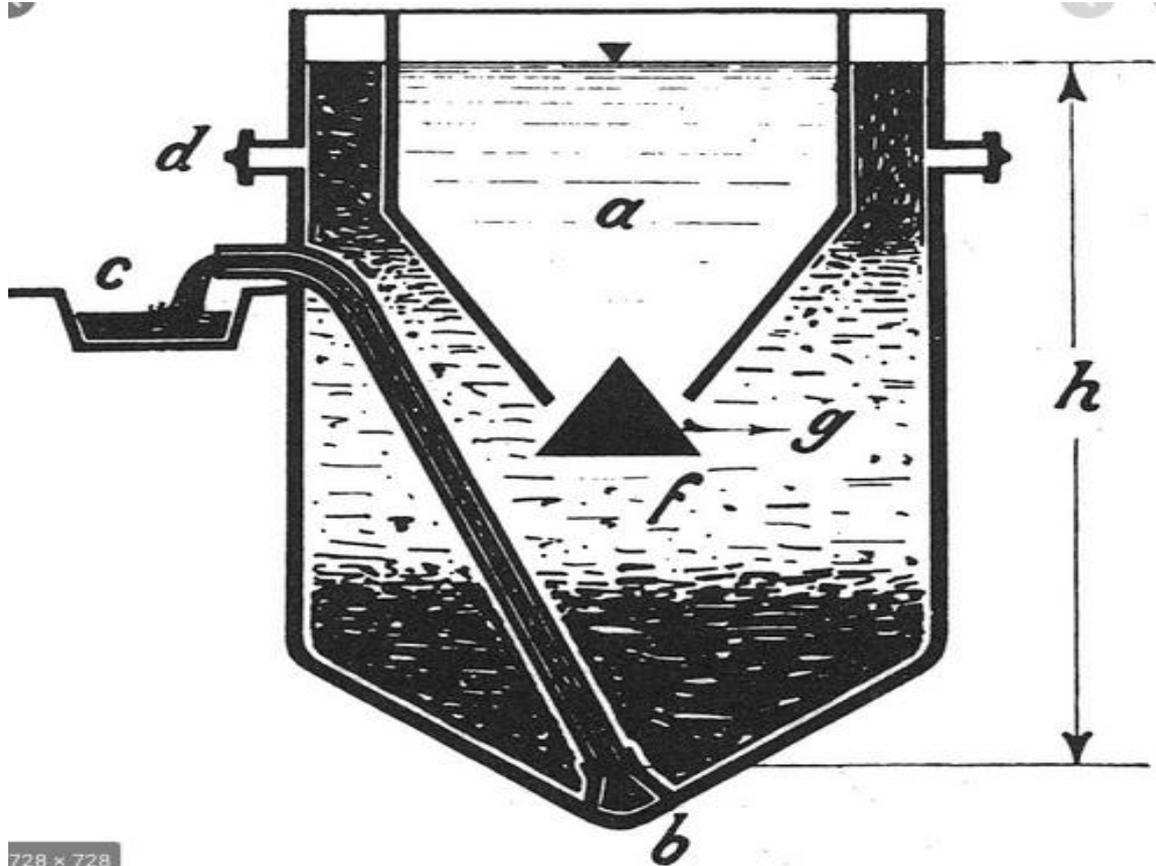
Fuente: elaboracion propia

Anexo. 2.1. Hotel Pasacaballos.



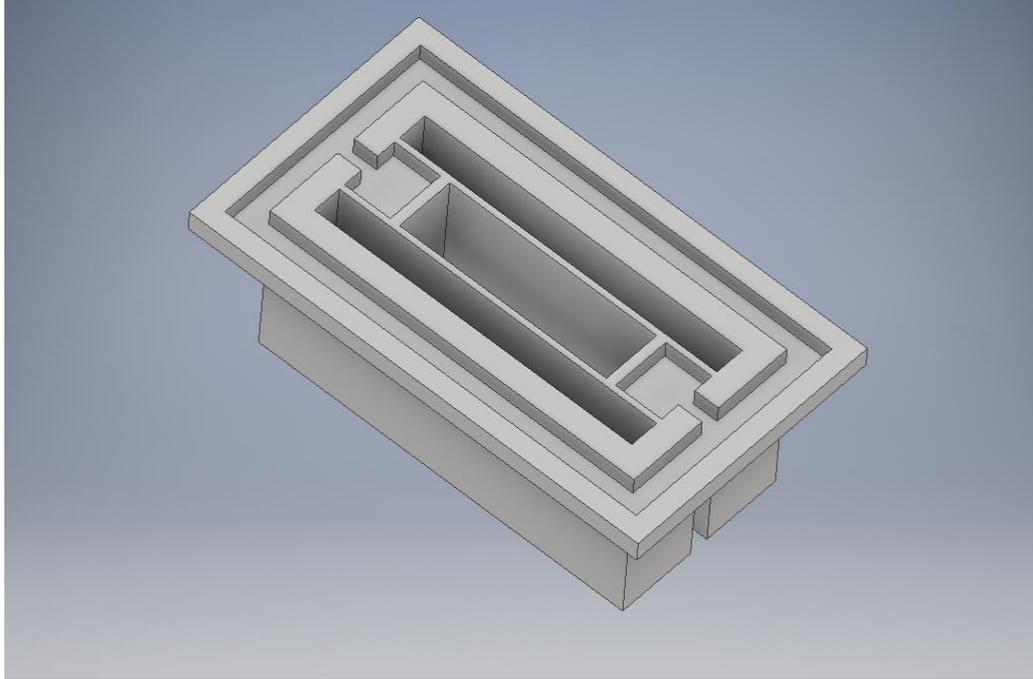
Fuente: Elaboracion propia.

Anexo 3. El tanque Imhoff.



Fuente: (https://www.google.com/search?q=que+es+tanque+imhoff?&client=firefox-b-d&sxsrf=ALeKk014Fr5yPq4EP0MxhPkLk_Uhn3iBew:1593196445811&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=jti4LWF99Hai_M%252CIge2ZRWsHRlrvM%252C%252Fm%252F016jjh&vet=1&usg=AI4_-kQrf0gczAhzGC5D8uuniHkYgy2, 2020)

Anexo 4.



Fuente: elaboracion propia.