

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de fin de carrera titulado:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR CON
CAPACIDAD DE 1200 LITROS PARA LA OBTENCIÓN DE
BIOGÁS MEDIANTE RESIDUOS ORGÁNICOS”

Realizado por:

MARCO POLO ARELLANO JARAMILLO

Director de proyecto:

ING. LUIS EDUARDO TIPANLUISA, MSc.

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERO MECÁNICO AUTOMOTRIZ

Quito, 24 de Julio de 2013

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, MARCO POLO ARELLANO JARAMILLO, con cédula de identidad # 1717488926, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en éste documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a éste trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Marco Polo Arellano Jaramillo

C.C: 1717488926

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:
“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR CON CAPACIDAD
DE 1200 LITROS PARA LA OBTENCIÓN BIOGÁS MEDIANTE
RESIDUOS ORGÁNICOS”

Realizado por:
MARCO POLO ARELLANO JARAMILLO

Como Requisito para la Obtención del Título de:
INGENIERO AUTOMOTRIZ

Ha Sido dirigido por el profesor
LUIS EDUARDO TIPANLUISA, MSc.

Quien considera que constituye un trabajo original de su autor

Luis Eduardo Tipanluisa
DIRECTOR

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

ING. YAMANDÚ YÁNEZ, Mgs.

ING. PAOLO SALAZAR

Después de revisar el trabajo presentado,
lo han calificado como apto para su defensa oral ante
el tribunal examinador

Yamandú Yánez

Paolo Salazar

Quito, 24 de Julio de 2013

DEDICATORIA

Primordialmente a Dios por su bondad, puesto que me ha llenado de bendiciones y de salud, me ha brindado de su sabiduría, amor, paciencia, me ha cuidado y protegido en los momentos en los cuales me he sentido atribulado y me ha permitido madurar y crecer como ser humano.

Este proyecto va dedicado de una manera muy especial a mis padres y a mis abuelitos que con su cariño, sacrificio, honestidad y valores han sido un ejemplo de perseverancia y constancia ya que me han brindado un invaluable apoyo y fortaleza a lo largo de toda mi vida, así, ayudándome a alcanzar este nuevo objetivo tan anhelado al concluir una etapa más de mi vida.

Marco Arellano J.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Internacional SEK en la Facultad de Ingeniería Mecánica que me abrió las puertas, me brindo el conocimiento y me ha formado como un profesional útil a la sociedad.

A los profesores que por su entrega y profesionalismo han sido aquellos quienes han compartido su experiencia y conocimiento permitiéndome alcanzar un escalón más en mi carrera profesional.

También quiero agradecer a mis compañeros y amigos que me brindaron de su apoyo y ayuda en los momentos más difíciles de mi vida, por compartir momentos de alegría y tantas vivencias que dejan grandes enseñanzas e inolvidables experiencias.

Marco Arellano J.

Resumen

En la actualidad existe una generación considerable de residuos, que al no ser gestionados convenientemente representan un grave problema para la salud de la población y el medio ambiente, de ahí radica la importancia de buscar nuevas alternativas para la reutilización y posterior aprovechamiento de dichos residuos, con la finalidad de obtener nuevas alternativas energéticas y disminuir el impacto medio ambiental.

El proceso de descomposición anaeróbica permite degradar la materia orgánica y obtener productos de valor tales como el fertilizante orgánico, también llamado biol y biogás. El primer producto tiene muy buenas propiedades en lo que concierne al tema de la agricultura y regeneración de suelos. El segundo es un combustible que presenta buenas características y puede ser empleado para varios fines, entre ellos cocinar, generar calor y alumbrado, entre otros.

La visión de este trabajo es describir de una manera general este proceso, para lo cual se detallan algunos aspectos.

Es importante identificar los conceptos básicos de la descomposición anaerobia, que describe el proceso biológico que degrada la materia orgánica con la intervención de bacterias para su posterior producción de fertilizante y biogás.

El proceso de producción de biogás depende, principalmente de la materia a utilizarse, además de parámetros como la temperatura, el tiempo de degradación y el control de pH.

Los procesos aerobios y anaerobios difieren desde el punto de vista de productos finales, ya que el proceso aerobio como producto final genera dióxido de carbono y agua; por otro lado en el proceso anaerobio se obtiene productos tales como etanol, metanol y gas metano, además de otros gases generados en menor proporción que también incluyen CO₂.

Abstract

Nowadays there are a considerable waste generation, which not being managed properly, represent a serious problem for the population health and the environment, for these reasons it is important to find new methods for the reuse of such waste, in order to get new energy alternatives and reduce environmental impact.

The anaerobic decomposition process can degrade organic matter and get valuable products such as organic fertilizer and biogas. The first product has very good properties with respect to the topic of agriculture and soil regeneration. The second is a fuel that has good characteristics and can be used for many purposes, including cooking, heat generation and lighting, among others.

The vision of this work is to describe in a general way this process, for which details some aspects.

It is important to identify the basic concepts of anaerobic process, which describes the biological process that degrades the organic material with the intervention of bacteria for subsequent production of fertilizer and biogas.

The biogas production process depends mostly on the material to be used, as well as parameters such as temperature, degradation time and pH control.

Aerobic and anaerobic processes differ from the viewpoint of final products, as the end product aerobic process generates carbon dioxide and water, on the other hand in the anaerobic process obtained products such as ethanol, methanol and methane, and other gases also including CO₂.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

ORDEN	CONTENIDO	PÁGINA
	DECLARACIÓN JURAMENTADA.....	III
	DECLARATORIA	IV
	DEDICATORIA	VI
	AGRADECIMIENTO	VII
	RESUMEN	VIII
	ABSTRACT.....	IX
	ÍNDICE DE TABLAS	XIII
	ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
	 CAPÍTULO I	 1
	INTRODUCCIÓN	1
1.1	EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.	1
1.1.1	Planteamiento del problema.	1
1.1.1.1	Diagnóstico del problema.....	1
1.1.1.2	Pronóstico.....	2
1.1.1.3	Control del Pronóstico.....	2
1.1.2	Formulación del Problema.....	2
1.1.3	Sistematización del Problema.....	2
1.1.4	Objetivo General.....	3
1.1.5	Objetivos Específicos.	3
1.1.6	Justificación.	3
1.2	MARCO TEÓRICO.	4
	La Biomasa.	4
	Concepto y origen de biomasa.	4
	Utilidades de la biomasa.	5

Aprovechamiento por combustión.....	7
El Biogás.....	9
Composición y Características.....	9
Metano.	9
Fuentes de obtención del biogás.	10
Componentes presentes en el biogás y sus efectos.	10
Principios de la Combustión.	13
Aplicaciones del biogás.	13
Purificación o acondicionamiento del biogás.	15
Principios del Tratamiento Biológico.....	15
Oxidación Biológica.	17
Proceso Aerobio.....	20
Proceso Anaerobio.....	21
Características de la fermentación metanogénica.	23
Microorganismos que no producen metano.	28
Microorganismos productores de Metano.	29
Producción de metano.....	30
Crecimiento biológico anaerobio.....	31
Proceso Anóxico.	33
Consideraciones Ambientales de Microorganismos.....	34
Factores a considerar en el proceso metanogénico.	36
Material de carga para la fermentación.	36
Relación Carbono – Nitrógeno (C/N).	37
Concentración de la carga.	38
La temperatura.....	39
Valor del pH.	39
Promotores e inhibidores de la fermentación.....	39
Biodigestores.	40
Características del digestor.	42
Componentes de un biodigestor anaeróbico.	42
Tipos de biodigestores.	43
Digestor esférico.	43
Digestor elipsoidal o cilíndrico.	44
Digestores de hormigón de funcionamiento continuo.....	45

Sistemas de agitadores por bombeo y calentadores de serpentín.....	47
Sistema batch o discontinuo.....	49
Sistema Horizontal.....	50
Parámetros de Diseño.....	50
Sistemas semi – continuos.....	55
Biodigestor tipo Hindú.....	55
Biodigestores tipo Chino.....	56
Sistemas continuos.....	57
1.2.1 Estado actual del conocimiento sobre el tema.....	57
1.2.2 Adopción de una nueva perspectiva teórica.....	59
1.2.3 Marco Conceptual.....	59
1.2.4 Identificación y Caracterización de las Variables.....	60
CAPÍTULO II.....	61
2.1 TIPO DE ESTUDIO.....	61
2.2 MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN.....	62
2.3 MÉTODO.....	62
Distribuciones muestrales.....	62
Muestreo sin reemplazamiento.....	63
Muestras aleatorias.....	63
Estadísticos Muestrales.....	63
Teoría de Estimación.....	63
2.4 POBLACIÓN Y MUESTRA.....	63
2.5 SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.....	64
2.6 VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS.....	64
2.7 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	65
2.8 PROCESAMIENTO DE DATOS.....	66
CAPÍTULO III.....	68
3.1 LEVANTAMIENTO DE DATOS.....	68
3.2 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	70
CAPÍTULO IV.....	83
4.1 CONCLUSIONES.....	83
4.2 RECOMENDACIONES.....	84
BIBLIOGRAFÍA.....	85
ANEXOS.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

ORDEN	CONTENIDO	PÁGINA
Tabla 1.	Valor energético de algunos tipos y productos de biomasa.....	7
Tabla 2.	Composición promedio de biogás.....	9
Tabla 3.	Componentes de biogás y su efecto en las propiedades	11
Tabla 4.	Principales procesos de tratamiento biológico.....	17
Tabla 5.	Oxidantes y reductores de respiraciones bacteriales.....	20
Tabla 6.	Clasificación de las metanobacterias	29
Tabla 7.	Principales productos de la fermentación ácida.....	30
Tabla 8.	Ventajas y desventajas del proceso anaerobio	32
Tabla 9.	Ventajas y desventajas del proceso aerobio.....	33
Tabla 10.	Valores del coeficiente de actividad a la temperatura	35
Tabla 11.	Relación carbono – nitrógeno de materia prima.....	37
Tabla 12.	Contenido de sólidos.....	39
Tabla 13.	Concentración inhibidora de inhibidores comunes.....	40
Tabla 14.	Relación estiércol – agua para diferentes tipos de fuentes	51
Tabla 15.	Biodigestores usados en zonas rurales.....	57
Tabla 16.	Protocolo de tabulación	69
Tabla 17.	Temperatura en el interior del reactor.....	71
Tabla 18.	Valores de potencial de hidrógeno.....	73
Tabla 19.	Presión en el gasómetro	75
Tabla 20.	Presión en el reactor.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

ORDEN	CONTENIDO	PÁGINA
Figura 1.	Descomposición microbial de la materia orgánica.....	16
Figura 2.	Proceso aerobio de respiración de oxígeno	20
Figura 3.	Diagrama de la oxidación anaerobia	22
Figura 4.	Fermentación anaeróbica de glucosa en etanol	23
Figura 5.	Formación de metano en la digestión anaerobia	26
Figura 6.	Trayectorias de fermentación de metano.....	27
Figura 7.	Crecimiento biológico anaerobio	31
Figura 8.	Componentes de un biodigestor horizontal	42
Figura 9.	Biodigestor esférico.....	44
Figura 10.	Digestor de hormigón de funcionamiento continuo	46
Figura 11.	Digestor tipo Olade-Guatemala.....	49
Figura 12.	Biodigestor horizontal	50
Figura 13.	Biodigestor Tipo Hindú.....	55
Figura 14.	Biodigestor tipo Chino	56
Figura 15.	Curva de la temperatura interna	78
Figura 16.	Curva de concentración de hidrógeno	80
Figura 17.	Curva de presión en el gasómetro	81
Figura 18.	Curva de presión en el reactor	82

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 El Problema de Investigación.

1.1.1 Planteamiento del problema.

Las distintas actividades que ha realizado el ser humano desde su aparición sobre la tierra, han ocasionado varios cambios en el medio que lo rodea. El hombre se caracteriza por su capacidad de adaptar el entorno natural a sus necesidades, conforme ha aumentado la población, también ha crecido la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías, que brinden un aprovechamiento eficiente de los recursos naturales.

Los cambios o alteraciones en el entorno han traído consigo consecuencias y daños al medio ambiente, con el paso de los años estos se han vuelto cada vez más severos, y en algunos casos prácticamente irreversibles.

1.1.1.1 Diagnóstico del problema.

Tanto en el sector urbano como rural, la sobreproducción de residuos en la Ciudad de Quito generan varios problemas de carácter ambiental y sanitario, ya que al no contar con un correcto manejo y clasificación, estos generan potenciales dificultades a la población, ya que al descomponerse en lugares no adecuados, originan problemas de salud y alteraciones en el ecosistema. Al depositar gran cantidad de residuos en los rellenos sanitarios, se rompe el ciclo natural de descomposición y se contaminan fuentes de agua subterránea, también favorece a la generación de agentes patógenos muy peligrosos.

Al no existir una adecuada clasificación de los residuos, resulta imposible aprovechar estos recursos, los cuales pueden ser reutilizados durante un proceso de tratamiento de degradación de materia, así generando una importante fuente de energía alternativa que cumplirá la meta de buscar reducir los índices de contaminación y proliferación de enfermedades.

1.1.1.2 Pronóstico.

El proyecto propone la elaboración de un modelo que permita aprovechar las propiedades energéticas contenidas en los residuos orgánicos, tales como desechos animales y vegetales para la producción de biogás, con la finalidad de reducir la cantidad de gases contaminantes que provocan el efecto invernadero, y mejorar la calidad de vida de los habitantes, al ofrecer un tratamiento eficaz de estos residuos, disminuyendo la contaminación del agua, el suelo, entre otros.

1.1.1.3 Control del Pronóstico.

Para el aprovechamiento de residuos orgánicos, es necesario tomar en cuenta varios parámetros, dentro de los cuales es indispensable tener un concepto muy claro sobre residuos, entablando un análisis detallado de sus tipos, procedencia, clasificación, balances, características, entre otros, y posteriormente darles el tratamiento más efectivo con la finalidad de explotar al máximo sus propiedades y lograr la mayor eficiencia posible en la obtención del producto final.

1.1.2 Formulación del Problema.

¿Se podrán aprovechar los residuos para generar energía y reducir los potenciales efectos negativos en la población?

1.1.3 Sistematización del Problema.

¿Bajo qué parámetros se procedería a la clasificación de los diferentes residuos?

¿Cuál es el objetivo primordial de aprovechar los residuos orgánicos, materia considerada desperdicio?

¿Qué procesos bioquímicos serían los más apropiados para lograr una producción óptima de biogás?

1.1.4 Objetivo General.

Obtener biogás a partir de residuos orgánicos mediante un biodigestor horizontal con capacidad de 1200 litros.

1.1.5 Objetivos Específicos.

- Seleccionar y clasificar cuidadosamente la biomasa para el aprovechamiento de residuos orgánicos en la producción de energía limpia.
- Determinar los procesos de digestión para el tratamiento de los residuos orgánicos.
- Diseñar y construir el biodigestor tomando en cuenta la clasificación de la biomasa y los equipos a utilizar.
- Obtener el biogás a partir de los residuos orgánicos mediante un biodigestor horizontal.

1.1.6 Justificación.

La elevada producción de basura y desperdicios en la ciudad de Quito constituye una problemática medio ambiental que debe ser tratada eficientemente con la finalidad de reducir la contaminación y mejorar la calidad de vida del ser humano, razón por la cual es conveniente presentar la elaboración de un modelo eficiente de tratamiento de residuos para su aprovechamiento.

El desarrollo de biodigestores es una manera innovadora de producir energía limpia, lo cual contribuye con el medio ambiente al mantener un control y aprovechamiento adecuados de los residuos.

Este proyecto refleja la importancia de la búsqueda e implementación de nuevas tecnologías para la generación de energía, de esta manera aportando al beneficio de la comunidad, creando conciencia y un punto de vista diferente sobre los peligros que representan los residuos y como poder aprovecharlos de la manera más apropiada.

Se pretende aportar y dejar las bases para el diseño e implementación de plantas de tratamiento de residuos orgánicos con el objetivo de obtener biogás y poder recuperar la energía de los desechos orgánicos, pero a la vez reducir significativamente el impacto sanitario en la ciudad y eliminar posibles focos de infección que afectarían la salud de los habitantes.

1.2 Marco Teórico.

La Biomasa.

Concepto y origen de biomasa.

El término biomasa, se lo podría definir como un elemento que guarda relación con la energía utilizable, también como cualquier material de origen orgánico (microorganismos, plantas o animales), del cual se puede extraer energía mediante procesos biológicos.

La biomasa, se caracteriza por su formación a base de compuestos de carbono reducido y, poseer un carácter energético, orgánico y no fósil. En sentido restringido, la biomasa es el resultado del proceso de la fotosíntesis (madera, cultivos agrícolas, algas y microorganismos fotosintéticos). El material vegetal es posteriormente procesado (alimentación animal o procesos tecnológicos de las industrias agroalimentarias) y genera residuos o subproductos. (Vega, 1983, pág. 130).

En lo que concierne al origen de la biomasa, se da una vital importancia a los procesos de los organismos vegetales de los cuales un factor importante es la acción solar, sin la cual las plantas serían incapaces de cumplir con sus ciclos naturales de supervivencia y obtención de energía.

El sol es el origen principal de los fenómenos físicos y físico – químicos, naturales o desarrollados por el hombre, implicados en la generación de energía potencial, ya sea térmica, química, o de energía cinética. Energías que utilizamos para producir trabajo y calor.

Las plantas aprovechan la radiación solar para su metabolismo; lo hacen mediante la fotosíntesis, que es un proceso mediante el que éstas transforman la energía solar en energía química. El proceso fotosintético está comprendido por un complejo entramado de reacciones fotoquímicas y bioquímicas que ocurren en un órgano celular llamado mitocondria, verdadera fábrica de energía que sostiene la vida.

Cuando hablamos de energía química nos referimos a la implicada en la formación o la rotura de los enlaces entre los átomos que forman las moléculas. La energía química se almacena en forma de moléculas orgánicas (con el carbono como principal componente estructural). (Ortega, 2000, pág. 193).

El proceso fotosintético hace crecer la biomasa vegetal que en la naturaleza, o mediante los ciclos naturales de cultivo establecidos por el hombre, produce materia orgánica.

La biomasa vegetal se encuentra en la base de la pirámide trófica, siendo el alimento necesario de los animales para su crecimiento, de este modo se desarrolla la biomasa animal, que durante su metabolismo y al final de su ciclo de vida produce también residuos aprovechables energéticamente.

La biomasa residual es todo desecho de materia orgánica proveniente de los seres vivos, los residuos orgánicos que a menudo se consideran un subproducto, pueden llegar a cobrar un valor primordial en los procesos productivos.

De acuerdo con Ortega (2000) “no toda la biomasa que nos interesa tiene porque ser residual. Podemos cultivar plantas productoras de aceites, de hidrocarburos o de azúcares fermentables, con el fin de obtener biocombustibles, éstos son los llamados cultivos energéticos” (p. 193).

La biomasa útil para su aprovechamiento energético proviene de varias fuentes como: cultivos energéticos, o de residuos orgánicos, ganaderos, agrícolas, forestales, urbanos e industriales.

Utilidades de la biomasa.

La biomasa tiene múltiples utilidades, uno de sus usos más comunes, es la generación de energía por medio de la combustión.

La combustión de la biomasa sólida puede realizarse directamente en un hogar, previo secado cuando ésta tiene excesiva humedad. Sin embargo, mediante tratamientos físicos, químicos o biológicos intermedios obtenemos combustibles líquidos o gaseosos, éstos pueden ser

quemados tanto en calderas como en motores, de donde podemos extraer calor y trabajo mecánico.

Así tenemos procesos primarios para el aprovechamiento energético de la biomasa:

a) *Biomasa de calidad o primaria*. La que se produce por conversión directa de energía solar en energía química, bien espontáneamente, como son bosques, selvas, etc., o bien con propósitos específicos por parte del hombre, como es el caso de la agricultura o cultivo industrial de microorganismos. Sirve para cubrir necesidades primarias del hombre, como alimentación, o secundarias, como productos industriales, papel, fármacos, etc.

Y como procesos secundarios:

b) *Residuos o biomasa secundaria y terciaria*. Esta biomasa puede tener diversos orígenes (agrícola, forestal, industrial o urbano). La biomasa secundaria y terciaria constituyen hoy un objetivo de interés para la industria de la fermentación.

Las plantas superiores forman biomasa continental, mientras que la biomasa acuática está constituida en más de un 90% por algas microscópicas (fitoplancton) que se localizan en la zona superficial de los océanos donde los nutrientes minerales son escasos. El 68% de la producción continental de la biomasa es suministrado por bosques, el resto procede de las praderas (16%), así como de las tierras cultivadas (8%).

Por otro lado, la obtención, de los combustibles procedentes de la biomasa, ya sea residual o no, requiere, casi siempre, tratamientos físicos, químicos o biológicos, y entre éstos están:

- El secado para eliminar la humedad.
- La combustión incompleta para producir carbón vegetal.
- La extracción de aceites biocombustibles de plantas oleaginosas.
- La fermentación alcohólica.
- La producción de biogás.

Aprovechamiento por combustión.

Las plantas tienen la capacidad de transformar la materia orgánica y la energía en vida.

Además convierten el CO₂ de la atmósfera en oxígeno, es decir, actúan como purificadoras de la atmósfera.

En su texto, Madrid (2009) señala que “la biomasa se considera una fuente de energía renovable, ya que mientras contemos con el sol y el agua, las plantas podrán seguir realizando el proceso químico de la fotosíntesis, lo que conlleva a la liberación de la energía contenida en la glucosa, celulosa, etc.” (p. 168).

La biomasa puede liberar energía de dos formas:

Por combustión directa, cuando quemamos la madera, hojas y ramas secas, liberando el calor que contienen. La combustión directa se aplica a la biomasa de bajo contenido en humedad.

Por combustión indirecta, mediante la acción de levaduras, sus azúcares se transforman en alcohol, que a su vez se puede usar como fuente energética. La forma indirecta se aplica a la biomasa con gran contenido en humedad.

En la tabla 1, podemos identificar el valor energético de biomásas en combustión directa e indirecta. Como se aprecia, la madera seca o la masa vegetal seca produce más energía que la madera verde, ya que ésta última contiene más humedad.

Tabla 1
Valor energético de algunos tipos y productos de biomasa

Biomasa	MJ/kg
Madera verde (por combustión directa)	8 MJ/kg
Madera seca (por combustión directa)	20 MJ/kg
Metano (por fermentación de biomásas)	55 MJ/kg
Carbón vegetal (por combustión anaeróbica de masa vegetales)	23 – 30 MJ/kg
Etanol (por combustión aeróbica de biomásas)	28 MJ/kg

Fuente: Madrid, A. Energías Renovables. (2009).

Es importante mencionar que, aunque el carbón, el petróleo y el gas provienen de residuos orgánicos vegetales y animales, no se consideran biomásas, ya que para su formación se

necesitaron millones de años, es decir no son renovables. Por otro lado, la biomasa de los árboles, las hojas secas, el mosto de la uva, la caña de azúcar, etc., son renovables ya que su ciclo de producción es relativamente corto. Existe una gran variedad de productos que pueden ser utilizados como biomasa, los cuales se detallarán a continuación:

Biomasa natural. La procedente de la poda de árboles, limpieza de bosques, etc.

Biomasa residual seca. Procedente de actividades agrícolas, forestales, industrias de la alimentación, de la madera, etc. Este tipo de industrias producen residuos sólidos tales como virutas, paja, etc., con un contenido energético importante.

Biomasa residual húmeda. Se caracteriza por ser líquida. Así por ejemplo, tenemos los purines como resultado de la actividad ganadera. Las aguas fecales como resultado de la actividad humana. Otro ejemplo son las vinazas que se producen al fabricar alcohol, o los alpechines (aguas de vegetación), residuo de la extracción del aceite de oliva.

Cultivos Energéticos. Se está cultivando maíz, girasol, caña de azúcar, para usos no alimenticios. Por ejemplo, del girasol podemos sacar aceites energéticos que tienen muchas aplicaciones. Este tipo de aplicaciones energéticas se están desarrollando en la actualidad, por lo que todavía no se conocen a fondo sus posibles ventajas e inconvenientes. Efectivamente pueden tener un impacto ambiental y un impacto económico – social. (Madrid, 2009, pág. 171).

Los llamados cultivos energéticos, son aquellos cultivos tradicionales destinados a alimentación humana o cultivos de especies vegetales de los cuales se obtienen productos como aceite, alcoholes, entre otros derivados y los podemos clasificar en:

Cultivos tradicionales. Son los mismos que tradicionalmente se han hecho para la alimentación humana, tales como la caña de azúcar, el maíz, etc.

Cultivos raros. Se trata de especies vegetales de especiales características, que pueden cultivarse en terrenos malos, con pendiente, con escasez de agua o malas condiciones climatológicas (helechos, cardos, etc.), y de los que es posible extraer energía.

Cultivos en agua. Se ha visto la posibilidad de hacer cultivos directamente en el agua, como algas por ejemplo.

Cultivos de plantas productoras de combustibles líquidos. Ciertas plantas tales como las palmeras, jojobas, etc., son capaces de producir sustancias que pueden ser usadas como combustibles en instalaciones industriales. (Madrid, 2009, pág. 171)

El Biogás.

Composición y Características.

El biogás es producido gracias a bacterias durante la degradación o fermentación de la materia orgánica, en condiciones específicas de ausencia de oxígeno (proceso anaerobio).

Guevara (1996) sostiene que “el término de biogás se refiere a una mezcla constituida principalmente de Metano (CH_4), Dióxido de Carbono (CO_2) y pequeñas proporciones de otros gases tales como Nitrógeno (N_2), Hidrógeno (H_2) y Sulfuro de Hidrógeno (S_2H)” (p. 40). En la tabla 2, se detallan los principales componentes del biogás.

Tabla 2
Composición promedio de biogás

Componente	Volumen (%)
Metano (CH_4)	55 – 65
Dióxido de Carbono (CO_2)	34 – 45
Nitrógeno (N_2)	0 – 3
Hidrógeno (H_2)	0 – 1
Sulfuro de Hidrógeno (S_2H)	0 – 1

Fuente: Guevara, A. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. (1996).

El metano es el principal componente del biogás, del contenido de éste depende el valor energético del gas.

Metano.

El metano es un hidrocarburo que se presenta en forma de gas, en la naturaleza se produce como producto de la descomposición anaeróbica de sustancias vegetales, principalmente celulosa, por la acción de microorganismos.

Es el principal componente del gas natural, constituyendo aproximadamente el 97% de este.

Mediante digestión anaerobia, es decir ausencia de oxígeno, la celulosa de los excrementos se degrada dando un gas que contiene aproximadamente un 60% de metano. Las fermentaciones anaeróbicas, también llamadas metanogénicas, ocurren de forma natural en la naturaleza. Podemos citar varios ejemplos al respecto:

A) El gas de los pantanos, donde las aguas estancadas, con residuos orgánicos, ausencia de aire y bacterias anaerobias, da lugar al desprendimiento de metano.

- B) El gas metano que acompaña al petróleo en los yacimientos.
- C) El gas producido en la digestión de los animales bovinos. (Madrid, 2009, pág. 175)

Fuentes de obtención del biogás.

Fuentes naturales (pantanos).

El metano además de ser producido mediante la acción de microorganismos anaeróbicos, también se desprende de los lodos blandos en el fondo del agua de lagos, estanques, pantanos, etc., por lo que se le suele denominar gas de los pantanos.

Los pantanos, aguas estancadas, etc., producen gas gracias a las bacterias que obtienen su energía a través de la producción metabólica de gas metano, a partir del dióxido de carbono y del hidrógeno. La mayoría son anaerobias, es decir, que viven en ausencia de oxígeno. Las bacterias de este género, provocan la descomposición anaerobia de la materia de origen vegetal, por ello se encuentran en el suelo y en el tracto digestivo de animales rumiantes. (Anónimo, 2012, pág. 4).

Extracción de combustibles fósiles.

El petróleo representa la fuente de energía más importante, en la sociedad actual; constituye una mezcla de hidrocarburos presentes en estado sólido, líquido y gaseoso.

El gas natural se encuentra en los yacimientos de petróleo, aunque su composición tiende a variar en función del yacimiento, está compuesto por gas metano en proporciones que varían entre 90 y 97%.

El petróleo, al igual que el gas natural, constituye la principal fuente de alcanos, por destilación pueden separarse de él multitud de productos útiles, denominados fracciones. En la primera fracción de la destilación del petróleo, consiste en calentarlo por debajo de los 20°C. Los primeros son metano (CH_4), etano (C_2H_6) y butano (C_4H_{10}) siendo los principales componentes de los gases del petróleo. Hoy en día se intenta almacenar en lo posible para reaprovecharlo formando el llamado gas natural. (Anónimo, 2012, pág. 4).

Componentes presentes en el biogás y sus efectos.

Los componentes que se encuentran presentes en el biogás y los efectos en las propiedades del mismo, se los da a conocer en la tabla 3.

Tabla 3
Componentes de biogás y su efecto en las propiedades

Componente	Efecto
CO ₂	Baja el poder calorífico
	Incrementa el número de metano
	Causa corrosión
	Daña celdas alcalinas de combustible
H ₂ S	Corrosión en equipos
	Emisiones de SO ₂ después de los quemadores
	Emisión de H ₂ S en combustión imperfecta
	Inhibición de la catálisis
NH ₃	Emisión de NO _x
	Daño en las celdas de combustible
Vapor de agua	Corrosión en equipos
	Daños de instrumentos por condensado
N ₂	Baja el poder calorífico

Fuente: Pérez, J. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. (2010).

Efectos del CO₂ en el biogás.

La presencia de CO₂ en el gas se mide en la razón de CO₂/metano (%vol) y puede ser controlada parcialmente debido a que es esencial en la formación de metano en el gas por lo que no se busca hacerlo desaparecer. Los factores que afectan la composición de CO₂ son:

La presencia de compuestos con largas cadenas de hidrocarburos, por ejemplo compuestos con alto contenido en grasas ayudan a mejorar la calidad del gas cuidando de no afectar la acidez y la cantidad de átomos de carbono presentes en el sustrato.

Generalmente la descomposición anaeróbica de la biomasa mejora con el tiempo de exposición, cercano al final del tiempo de residencia¹, el contenido de metano aumenta desproporcionadamente a medida que el contenido de CO₂ va desactivando el proceso de hidrólisis.

El proceso de fermentación toma lugar de manera más rápida si el material en el reactor² está distribuido homogéneamente.

Un alto contenido de líquido en el reactor influye en una alta concentración de CO₂ disuelto en el agua, lo que disminuye el nivel de CO₂ presente en la fase gaseosa.

A mayor temperatura de fermentación, disminuye la cantidad de CO₂ disuelto en el agua.

¹ Tiempo de residencia: Periodo en el cual se aprovecha la biomasa para extraer biogás, este varía según el control de los parámetros y el sustrato de biomasa utilizada.

² Reactor. Lugar del biodigestor donde toma lugar la biodigestión.

Una alta presión durante el proceso lleva a una mayor concentración de CO_2 presente en el agua, esto se puede aprovechar si se purga material con alto contenido en CO_2 disuelto en al agua (claramente una vez iniciado el proceso de proliferación bacteriana). (Pérez, 2010, págs. 14, 15)

N_2 y O_2 presente en el biogás.

Pérez (2010) sostiene que “el nitrógeno y oxígeno presentes en el biogás usualmente se incorporan en las etapas de ventilación que tienen como objetivo eliminar el ácido sulfhídrico presente en el reactor, estos gases pueden entrar también normalmente en pequeñas cantidades si el sistema de tuberías no está perfectamente hermético”(p. 15).

Amoníaco (NH_3) presente en el biogás.

En su texto Pérez (2010) nuevamente señala que “normalmente la concentración de amoníaco es baja, menor a $0,1 \text{ mg/m}^3$, cuando los sustratos usados provienen de excremento de aves o algunos casos particulares de basura, la presencia de amoníaco se puede incrementar hasta no superar 1.5 mg/m^3 , por sobre este límite existe riesgo para quemadores” (p. 15).

Ácido sulfhídrico (H_2S) presente en el biogás.

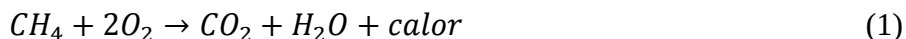
La presencia de H_2S en el biogás afecta al sistema de transporte o el equipo consumidor final, ya que tiene carácter corrosivo y puede corroer los equipos de metal, además al no removerse, la combustión del biogás generará dióxido de azufre que es dañino para el medio ambiente como promotor de la lluvia ácida.

La cantidad de H_2S depende principalmente del proceso utilizado para la obtención del biogás y del tipo de sustrato involucrado.

Un objetivo primordial es mantener el contenido de ácido sulfhídrico en los niveles más bajos posibles debido a que la mayoría de los componentes sufren daños irreversibles debido al alto potencial corrosivo. (Pérez, 2010, pág. 16)

Principios de la Combustión.

En su texto, Razo, E., & Villafuerte, M., (2007) sostienen que “El biogás mezclado con aire puede ser quemado en un amplio espectro de artefactos descomponiéndose principalmente en CO_2 y agua (H_2O)” (p. 5). La combustión del gas metano con desprendimiento de calor se puede expresar por la ecuación 1.



Donde:

CH_4 Metano; O_2 oxígeno; CO_2 dióxido de carbono; H_2O agua.

En la combustión ocurre una rápida oxigenación/oxidación del biogás. El requerimiento de aire mínimo sería del 21%, pero esta cifra debe ser aumentada para lograr una buena combustión. La relación aire – gas puede ser optimizada aumentando la presión del aire, incrementando la apertura de la válvula dosificadora de gas (el biogás requiere de una apertura 2 a 3 veces mayor a la utilizada por el metano puro y modificando la geometría del paso de aire desde el exterior. (Varnero, 2011, pág. 55)

Aplicaciones del biogás.

Dentro de las aplicaciones que se le puede dar al biogás, existen diversas opciones para su uso. Dentro de las cuales se puede destacar la producción de calor o vapor, la generación de electricidad y combustible de vehículos.

Producción de calor o vapor.

El uso más común que se le da al biogás es la generación de energía térmica, es decir calor. En los lugares donde se dificulta la obtención de combustibles por su escasez, es donde los sistemas de biogás proporcionan la energía necesaria para las actividades cotidianas.

Los sistemas de pequeña escala se pueden utilizar para iluminación. Los quemadores de gas convencionales se pueden adaptar fácilmente para operar con biogás, simplemente cambiando la relación aire – gas. El requerimiento de calidad de biogás para quemadores es bajo. Se necesita alcanzar una presión de gas de 8 a 25 mbar y mantener niveles de H_2S inferiores a 100 ppm para conseguir un punto de 150 °C. (Varnero, 2011, pág. 56).

Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad.

Existen sistemas combinados de calor y electricidad, que utilizan la electricidad generada por el combustible y el calor residual. Algunos sistemas combinados producen primeramente calor, mientras que la producción de electricidad pasa a segundo plano. Por otro lado, hay sistemas que producen principalmente electricidad y el calor residual se utiliza para calentar agua.

En ambos casos, se aumenta la eficiencia del proceso en contraste si se utilizara el biogás solo para producir electricidad o calor. Las turbinas de gas, microturbinas, desde 25 hasta 100 kW y turbinas grandes, de más de 100kW, se pueden utilizar para la producción de calor y energía, con una eficiencia comparable a los motores de encendido por chispa y con un bajo mantenimiento. Sin embargo, los motores de combustión interna son los usados más comúnmente en este tipo de aplicaciones. El uso de biogás en estos sistemas requiere la remoción de H_2S (bajo 100 ppm) y vapor de agua.

Las celdas de combustible se consideran las plantas de energía a pequeña escala del futuro para la producción de electricidad y calor con una eficiencia superior al 60% y bajas emisiones. (Varnero, 2011, pág. 56)

Combustible para vehículos.

El uso vehicular del biogás es posible y en la realidad se ha empleado desde hace algún tiempo.

Para esto, el biogás debe tener una calidad similar a la del gas natural, para usarse en vehículos que se han acondicionado para el funcionamiento con gas natural. La mayoría de vehículos de esta categoría han sido equipados con un tanque de gas y un sistema de suministro de gas, además del sistema de gasolina normal de combustible.

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

A fin de permitir una autonomía razonable el gas por su volumen debe ser almacenado en contenedores cilíndricos de alta presión (200 a 300 bar); este tipo de almacenamiento implica que el mismo deba ser purificado antes de su compresión.

La conversión de los motores es costosa (instalación similar a la del gas natural) y el peso de los cilindros disminuye la capacidad de carga de los vehículos. (Varnero, 2011, pág. 56)

Purificación o acondicionamiento del biogás.

El biogás ($\text{CH}_4 - \text{CO}_2$) no es absolutamente puro, puesto que contiene partículas de otros gases. Todas estas impurezas deben ser removidas dependiendo del tipo de utilización que tendrá el biogás.

La purificación del biogás es importante por dos razones principales: La primera, para aumentar el poder calorífico del biogás y, la segunda para cumplir los requerimientos de algunas aplicaciones tales como, motores, calderas, celdas de combustible, vehículos, etc.). El tratamiento al cual se somete el biogás, implica la eliminación de gran parte del CO_2 , vapor de agua y otros gases del biogás, mientras que el reformado es la conversión de metano en hidrógeno. (Varnero, 2011, pág. 57)

Principios del Tratamiento Biológico.

El tratamiento biológico de residuos supone la remoción de contaminantes mediante actividad biológica. La actividad biológica o de microorganismos se aprovecha para remover principalmente sustancias orgánicas biodegradables, coloidales³ o disueltas, mediante su conversión en gases que escapan a la atmósfera y en biomasa extraíble mediante sedimentación. La actividad biológica también se usa para remover nitrógeno y fósforo del agua residual. El proceso se esquematiza en la figura 1.

³ Sustancia coloidal. Sistema fisicoquímico formado por dos o más fases, principalmente: una continua, normalmente fluida, y otra dispersa en forma de partículas; por lo general sólidas.

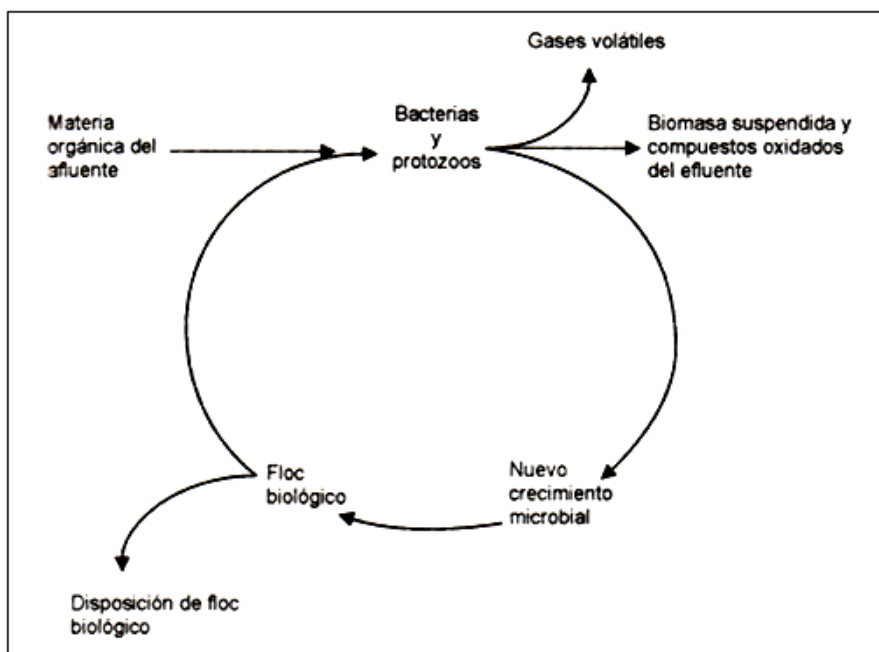


Figura 1. Descomposición microbiana de la materia orgánica, por Romero. J, 2001, *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño*.

El tratamiento biológico cuenta con cuatro grupos conocidos de procesos biológicos, los cuales son: procesos aerobios, procesos anóxicos, procesos anaerobios y procesos combinados, aerobios con anóxicos o con anaerobios.

Dentro de cada grupo hay, además, diferentes tipos, dependiendo de si el proceso es de crecimiento biológico suspendido, crecimiento biológico adherido o una combinación de ellos. Así mismo, dependiendo del régimen de flujo predominante, los procesos biológicos se consideran de flujo continuo o intermitente y del tipo de mezcla completa, flujo en pistón o flujo arbitrario. (Romero, 2001, pág. 226)

En los procesos de tratamiento aerobio el tratamiento se efectúa en presencia de oxígeno.

Los procesos anaerobios son aquellos en los cuales el tratamiento biológico ocurre en ausencia de oxígeno.

En el proceso anóxico se remueve nitrógeno, mediante la combinación de nitrato en nitrógeno gaseoso, en ausencia de oxígeno. El proceso anóxico se conoce como desnitrificación anaerobia, pero como las vías principales de conversión bioquímica no son anaerobias, sino una modificación de las vías aerobias, se considera más apropiado denominarlo proceso anóxico en lugar de anaerobio. (Romero, 2001, pág. 226)

En la tabla 4, se resumen los principales procesos de tratamiento biológico y su uso más importante.

Tabla 4
Principales procesos de tratamiento biológico

Tipo	Crecimiento	Proceso	Uso Principal
Aerobios	Suspendido	Lodos Activados	Remoción de DBO y nitrificación
		- Convencional	
		- Mezcla completa	
		- Aireación escalonada	
		- Estabilización y contacto	
		- Oxígeno puro	
		- Tasa alta	
		- Aireación prolongada	
		- Proceso Krauss	
		- Zanjón de oxidación	
	Adherido	Lagunas aireadas	Remoción de DBO y nitrificación
		Digestión aerobia	Remoción de DBO – estabilización
		Lagunas aerobias	Remoción de DBO y nitrificación
		Filtros percoladores	Remoción de DBO y nitrificación
		- Tasa baja	
		- Tasa alta	
		Torres biológicas	Remoción de DBO y nitrificación
		Unidades rotatorias de contacto biológico	Remoción de DBO y nitrificación
		Reactores de lecho fijo	Remoción de DBO y nitrificación
		Bardenpho	Remoción de DBO, N y P
Anóxicos	Suspendido	Desnitrificación	Remoción de nitrógeno
	Adherido	Desnitrificación	Remoción de nitrógeno
Anaerobios	Suspendido	Digestión anaerobia	Remoción de DBO – estabilización
		Anaerobio de contacto	Remoción de DBO
	Híbrido	Lagunas anaerobias	Remoción de DBO – estabilización
		Manto de lodos – flujo ascensional (PAMLA) o UASB	Remoción de DBO y SS
	Adherido	Filtro anaerobio	Remoción de DBO – estabilización
		Lecho expandido	Remoción de DBO – estabilización

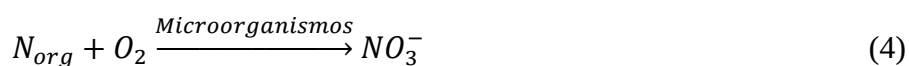
Fuente: Romero, J. Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño. (2001).

Oxidación Biológica.

El proceso de oxidación es el mecanismo mediante el cual microorganismos degradan materia orgánica, es decir, es la conversión de los elementos de su forma orgánica a su forma inorgánica altamente oxidada en un proceso conocido como mineralización.

Romero (2001) sostiene que “la mineralización, o descomposición microbiológica del material orgánico en productos finales inorgánicos como dióxido de carbono, agua, nitratos, ortofosfatos y sulfatos, es característica de la oxidación aerobia de carbohidratos y lípidos” (p. 227).

En síntesis, los elementos de la materia orgánica son convertidos de su forma orgánica a la inorgánica mediante oxidación biológica y se expresa en las siguientes ecuaciones:



Donde:

C_{org} carbono orgánico; O_2 oxígeno; CO_2 dióxido de carbono; H_{org} hidrógeno orgánico; H_2O agua; N_{org} nitrógeno orgánico; NO_3^- nitrato; S_{org} azufre orgánico; $SO_4^{=2-}$ sulfato; P_{org} fósforo; $PO_4^{=3-}$ ortofosfato.

Todo proceso de oxidación involucra la transferencia de electrones de una sustancia donante a una sustancia captadora de electrones. En este caso, la materia orgánica representa la donante de electrones para organismos vivos.

Algunos materiales inorgánicos tales como el amoníaco, sulfuros, hierro ferroso e hidrógeno molecular actúan como donantes de electrones, alimento o fuente de energía para algunas bacterias.

La oxidación orgánica representa la remoción o eliminación de electrones, o átomos de hidrógeno de las moléculas orgánicas. En la oxidación aerobia, el oxígeno es el captador final de electrones y, por tanto, es reducido, mientras que los donantes orgánicos e inorgánicos de electrones son oxidados.

En la oxidación anaerobia, otros compuestos como los nitratos, los sulfatos y el CO_2 pueden servir como aceptadores de electrones. El uso de sulfatos y de CO_2 como aceptadores de electrones requiere condiciones estrictamente anaerobias. En estas condiciones los productos finales son metano, CO_2 , H_2S y agua. Los nitratos, por el contrario, pueden usarlos bacterias facultativas en condiciones anóxicas, condiciones intermedias, las cuales se caracterizan por la formación de CO_2 , agua y nitrógeno gaseoso como productos finales. (Romero, 2001, pág. 228)

Romero (2001) manifiesta que “las reacciones de oxidación reducción biológica son reacciones de deshidrogenación – hidrogenación, en las cuales el sustrato⁴ oxidable o materia orgánica, pierde electrones en la forma de átomos de hidrógeno, es decir, es el donante de hidrógeno y el agente oxidante es el captador de hidrógeno o ganador de electrones” (p. 228). En el proceso aerobio, es decir en presencia de oxígeno, éste es reducido a agua y el carbono es oxidado en CO_2 . La oxidación de compuestos orgánicos involucra la remoción de electrones del compuesto orgánico y su transferencia a un captador de electrones, el cual sirve como agente oxidante y se reduce en el proceso.

En la mayor parte de los casos, cada paso oxidante supone la pérdida simultánea de dos electrones y de dos protones del sustrato orgánico oxidable. O sea, la oxidación de un compuesto orgánico se realiza mediante la remoción de dos átomos de hidrógeno, dos protones, y se llama, deshidrogenación. Por el contrario, la reducción de un compuesto orgánico supone la adición de dos electrones, dos átomos de hidrógeno, dos protones, y se denomina hidrogenación. (Romero, 2001, pág. 229)

La oxidación biológica es un proceso en el cual se produce energía y en el que compuestos tanto orgánicos como inorgánicos reducidos son oxidados en compuestos inorgánicos. Los principales reductores y oxidantes usados por las bacterias se enumeran en la tabla 5.

⁴ Sustrato. Término genérico usado para designar, en general, el alimento de los microorganismos.

Tabla 5
Oxidantes y reductores de respiraciones bacteriales

Reductor	Oxidante	Productos	Organismo
H ₂	O ₂	H ₂ O	Bacteria del hidrógeno
H ₂	SO ₄ ⁼	H ₂ O + S ⁼	Desulfovibrio
Compuestos orgánicos	O ₂	CO ₂ + H ₂ O	Muchas bacterias, plantas y animales
NH ₃	O ₂	NO ₂ ⁻ + H ₂ O	Bacteria nitrificante
NO ₂	O ₂	NO ₃ ⁻ + H ₂ O	Bacteria nitrificante
Compuestos orgánicos	NO ₃ ⁻	N ₂ + CO ₂	Bacteria desnitrificante
Fe ⁺⁺	O ₂	Fe ³⁺	Ferrobacillus (bacteria del hierro)
S ⁼	O ₂	SO ₄ ⁼ + H ₂ O	Thiobacillus (bacteria del azufre)

Fuente: Romero, J. Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño. (2001).

Proceso Aerobio.

Romero (2001) indica que “el proceso aerobio es un proceso de respiración de oxígeno en el cual el oxígeno libre es el único captador final de electrones; el oxígeno es reducido y el carbono es oxidado, al igual que la materia orgánica e inorgánica. Todos los organismos que usan oxígeno libre como captador de electrones son aerobios” (p. 229). Como se puede representar en la figura 2.

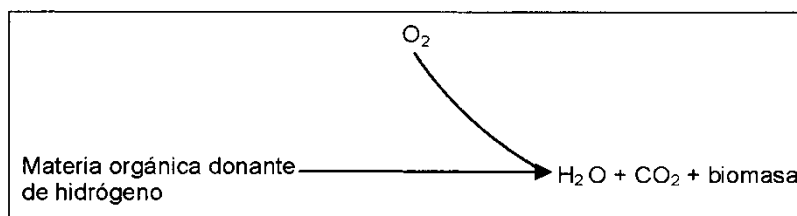


Figura 2. Proceso aerobio de respiración de oxígeno, por Romero. J, 2001, *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño*.

Este proceso se efectúa con la finalidad de obtener la energía necesaria para la síntesis de tejido celular nuevo. En ausencia de materia orgánica, el tejido celular será respirado endógenamente⁵ y convertido en productos gaseosos y en energía para mantenimiento.

⁵ Respiración endógena. Es la autooxidación producida por organismos en los procesos biológicos; ocurre después del agotamiento de las reservas de alimento; los microorganismos metabolizan su propio material celular sin reposición, ocurriendo una destrucción de sus células y una sucesión de nuevas especies.

Usualmente, las bacterias son los organismos más importantes en el tratamiento aerobio de residuos orgánicos porque son excelentes oxidantes de la materia orgánica y crecen bien en aguas residuales, siendo capaces de formar una capa gelatinosa de muy buenas características para la remoción de la materia orgánica. Tanto en los procesos de lodos activados⁶ como en filtros percolladores son comunes: *Zooglea ramigera*, *Pseudomonas*, *Flavobacterium* y *Alcaligenes*. (Romero, 2001, pág. 231)

En las reacciones metabólicas, los mecanismos de reacción para la oxidación del sustrato y la reducción del oxígeno se conocen como sistemas de transporte de electrones, los cuales proveen las trayectorias para obtención de energía y conversión en enlaces energéticos de fosfato o ATP (adenosina trifosfato).

La oxidación biológica aerobia o respiración aerobia está constituida por las reacciones de oxidación biológica en las cuales el oxígeno molecular es el captador final de electrones. Este es el proceso mediante el cual se transportan electrones del donante oxidable al oxígeno molecular para obtener la energía requerida para el crecimiento de los organismos aerobios. El oxígeno molecular libre es agregado al sustrato o materia orgánica, ocurriendo la oxidación o mineralización del residuo.

La reacción es muy eficiente porque libera grandes cantidades de energía; esta energía es almacenada en la biomasa sintetizada y los residuos de dicho catabolismo son compuestos estables de bajo contenido energético.

El proceso aerobio se ejecuta para obtener la energía necesaria para la síntesis de tejido celular nuevo. En ausencia de materia orgánica el tejido celular respirará endógenamente y se convertirá en productos gaseosos y en energía para mantenimiento. Las tres reacciones esenciales: catabolismo, anabolismo y autólisis ocurren simultáneamente. (Romero, 2001, págs. 231)

Proceso Anaerobio.

El proceso anaerobio o fermentación lo definió Pasteur como la vida sin aire. Es la descomposición u oxidación de compuestos orgánicos, en ausencia de oxígeno libre.

⁶ Proceso de lodos activados. Un proceso de lodos activados es un tratamiento biológico en el cual se agita y airea una mezcla de agua de desecho y un lodo de microorganismos.

Varnero (2011) sostiene que “en la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico” (p. 13).

El proceso se puede representar esquemáticamente como se indica en la figura 3.

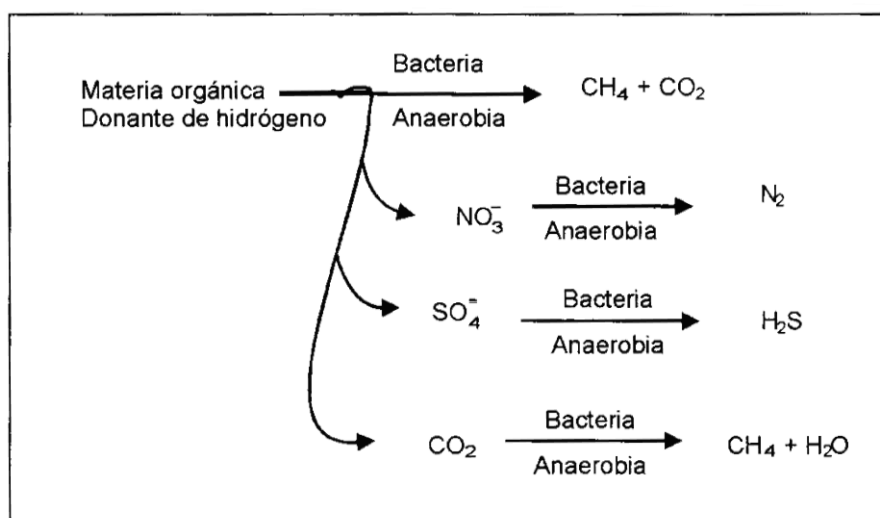


Figura 3. Diagrama de la oxidación anaerobia, por Romero. J, 2001, *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño*.

El uso de compuestos tales como sulfatos y CO₂ como captadores de electrones requiere condiciones estrictamente anaerobias, es decir, ausencia de oxígeno y nitratos.

El producto generado durante el proceso acepta los electrones liberados durante la descomposición de la materia orgánica. Por lo tanto, la materia orgánica actúa como dador y aceptador de electrones. En la fermentación, el sustrato es parcialmente oxidado y por lo tanto, solo una pequeña cantidad de la energía contenida en el sustrato se conserva. (Varnero, 2011, pág. 13)

El proceso microbiano es muy complejo y está integrado por múltiples reacciones. Se puede considerar el proceso anaeróbico de descomposición de la materia orgánica integrado por dos etapas: fermentación de ácidos y fermentación de metano, que ocurren simultáneamente.

En la figura 4, muestra la fermentación anaeróbica de glucosa en etanol. Es importante destacar que la mayor parte del metano se produce mediante la fermentación anaeróbica en la cual el acetato actúa como dador y captador de electrones. La producción de metano

mediante esta vía se conoce comúnmente como metanogénesis.

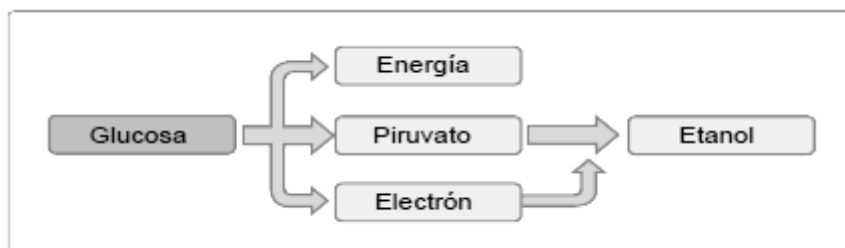


Figura 4. Fermentación anaeróbica de glucosa en etanol, por Romero. J, 2001, *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño*.

Romero (2001) indica que “En la fermentación ácida, los compuestos orgánicos de estructura compleja (proteínas, grasas, carbohidratos), son primero hidrolizados en unidades moleculares más pequeñas y sometidos a biooxidación para convertirlos en ácidos orgánicos de cadena corta, principalmente ácido acético, propiónico y butírico, hidrógeno y CO₂” (p. 234).

Características de la fermentación metanogénica.

La digestión de residuos es un proceso de descomposición anaeróbica, que consiste en la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno.

El proceso para producir metano (CH₄), dióxido de carbono y otros compuestos implica la realización de una serie de reacciones bioquímicas, donde participan una gran variedad de microorganismos, los cuales a una parte del carbono lo oxidan completamente formando anhídrido carbónico y a la otra lo reduce en alto grado para formar metano, siendo químicamente estables ambos compuestos. Casi todas las materias orgánicas pueden emplearse para la fermentación.

En la producción de biogás se utiliza principalmente, diversas aguas residenciales, aguas residuales de la industria liviana y alimenticia, diversos subproductos agrícolas (residuos de cultivos y excrementos de animales), además se aprovechan algunos cultivos energéticos. La composición química principal de estos recursos son

polisacáridos, proteínas, grasas y pequeñas cantidades de metabolitos⁷, la mayoría de ellos insolubles en agua.

Estos compuestos son desdoblados fundamentalmente por bacterias que descomponen los materiales orgánicos, algunos de los cuales producen gas metano y otros no producen ningún gas.

La cooperación e interacción entre hongos, protozoarios y otros microorganismos es lo que produce la transformación y degradación de los diversos materiales. (A. Guevara, 1996, pág. 11)

Hasta el presente, se conocen cuatro grupos de bacterias que poseen diferentes funciones catabólicas sobre el carbono, en el proceso de degradación de la materia orgánica hasta el metano, estos grupos son:

GRUPO I. Bacterias hidrolíticas, catabolizan sacáridos, proteínas, lípidos y otros constituyentes menores de la biomasa.

GRUPO II. Bacterias acetogénicas, productoras de hidrógeno, catabolizan ciertos ácidos grasos y productos finales neutros.

GRUPO III. Bacteria Homoacetogénicas, catabolizan compuestos monocarbonados, y/o hidrolizan compuestos multicarbonos hacia la producción de ácido acético.

GRUPO IV. Bacterias metanogénicas, catabolizan acetato compuestos monocarbonados para producir metano; contemplándose solo cuatro géneros:

Methanobacterium, Methanococcus, Methanospirillum y Methanosarcina. (A. Guevara, 1996, pág. 11).

En la fermentación metanogénica, los microorganismos metanogénicos, en condiciones estrictamente anaerobias, convierten los productos de la fermentación ácida en CO₂ y CH₄ principalmente. El metano no puede ser utilizado por las bacterias en condiciones anaerobias.

Inicialmente las bacterias hidrolíticas, mediante transformaciones enzimáticas, fermentan los compuestos orgánicos complejos en compuestos de masa molecular baja como los azúcares, aminoácidos, ácidos grasos y glicerol, adecuados para emplearlos como fuente de energía y carbón celular. Estos compuestos los utilizan las bacterias acetogénicas para producir ácido acético, propiónico, butírico, valérico y fórmico; CO₂ o hidrógeno, metanol y etanol. A partir del ácido acético y fórmico; (CO₂, H₂), y metanol, las bacterias del metano producen metano, dióxido de carbono y agua. (Romero, 2001, pág. 235).

La fermentación de metano en el proceso de digestión anaerobia supone tres etapas: La primera involucra procesos de hidrólisis, licuefacción y fermentación; la segunda, formación

⁷ Metabolito. Un metabolito es cualquier molécula utilizada o producida durante el metabolismo.

de hidrógeno y ácido acético; y la tercera, fermentación de metano; etapas realizadas por cinco grupos bacteriales principales, cada uno con metabolismo dependiente de los otros grupos involucrados en el proceso.

Para la hidrólisis y licuefacción del material complejo o insoluble, las bacterias fermentativas producen y excretan enzimas hidrolíticas⁸. Este eslabón del proceso es esencial y puede limitar el proceso de tratamiento anaerobio, por lo que se considera muy importante proveer una población grande de microorganismos, un sustrato orgánico concentrado, y mezcla y temperatura uniforme dentro del reactor. (Romero, 2001, pág. 235).

Considerando la acción de las bacterias en la fermentación metanogénica, se pone en conocimiento que el proceso es el siguiente:

Periodo de producción intensiva de ácidos (acidificación). Se inicia con los alimentos y compuestos de más fácil descomposición (grasas), existe gran producción de dióxido de carbono (CO_2), producción de ácido sulfhídrico (H_2S), ácidos orgánicos, bicarbonatos. El pH, se encuentra en la zona ácida 5,1 a 6,8.

Período de digestión de ácidos (Regresión, licuefacción). Ataque a los ácidos orgánicos y compuestos nitrosos, producción de pequeñas cantidades de dióxido de carbono (CO_2), nitrógeno e hidrógeno, Producción de bicarbonatos y de compuestos amoniacales, mal olor causado por el ácido sulfhídrico (H_2S). Gran parte de los sólidos flotan y el pH se encuentra entre 6,6 y 6,8.

Periodo de digestión intensiva o de fermentación alcalina, digestión de materias resistentes, proteínas, aminoácidos, celulosa, etc., producción de amoníaco, sales de ácidos orgánicos y grandes volúmenes de gas, principalmente metano y cantidades menores de dióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno. Pequeñas cantidades de sólidos flotantes. El pH pasa la zona alcalina 6,9 a 7,4. (A. Guevara, 1996, pág. 12).

En la figura 5, se muestra un esquema de la formación de metano en la digestión anaerobia, es decir en ausencia de oxígeno.

⁸ Enzimas hidrolíticas. Son aquellas que rompen los enlaces covalentes por hidrólisis, es decir por el agregado de una molécula de agua (H_2O).

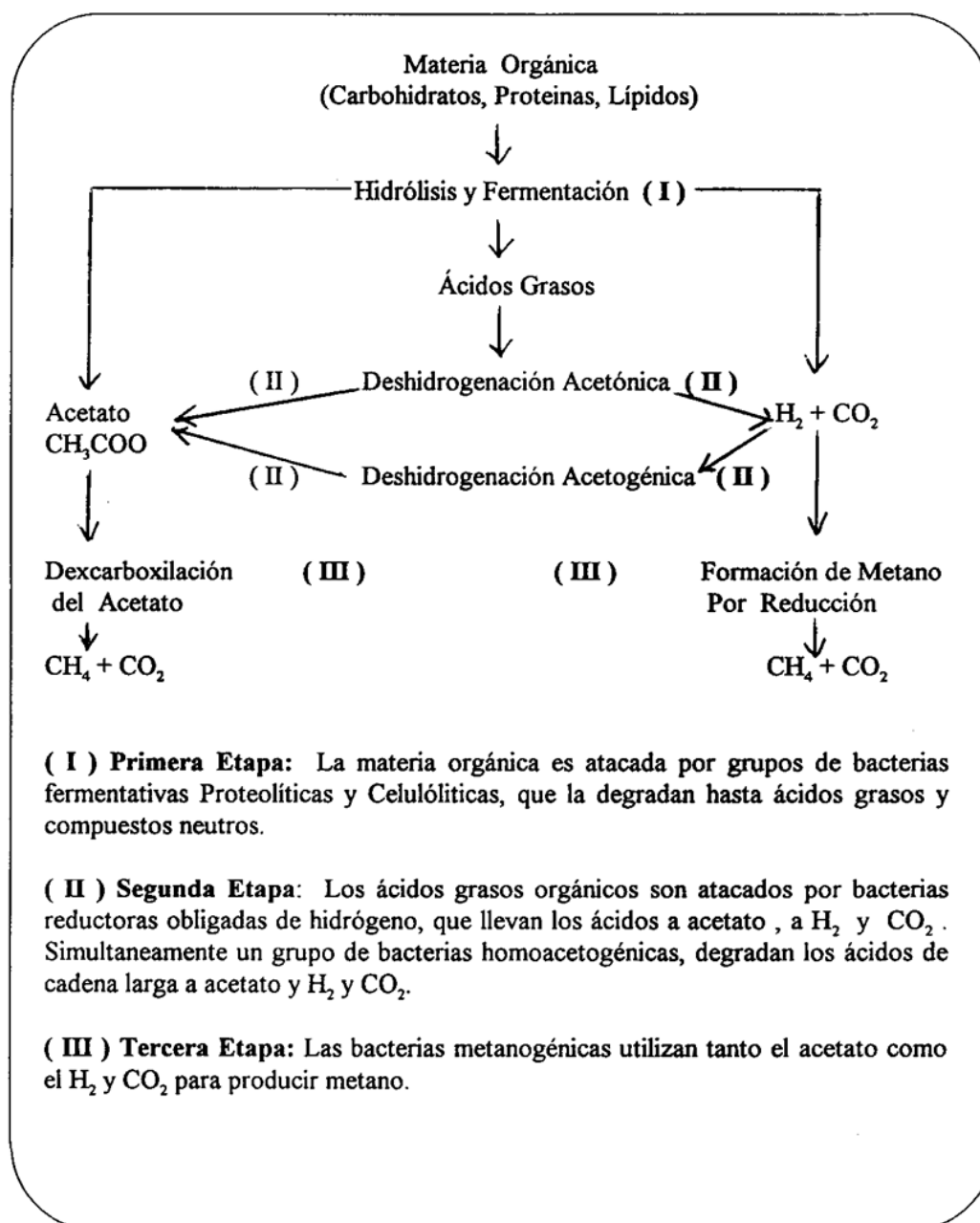


Figura 5. Formación de metano en la digestión anaerobia, por Guevara. A, 1996, *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos*.

La bacteria del metano es estrictamente anaerobia y se cree que sólo puede usar ácido acético, fórmico, metanol o hidrógeno como fuente de energía.

En términos de DQO⁹, la producción de metano en la digestión anaerobia se encuentra esquematizada como se indica en la figura 6.

⁹DQO. La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos.

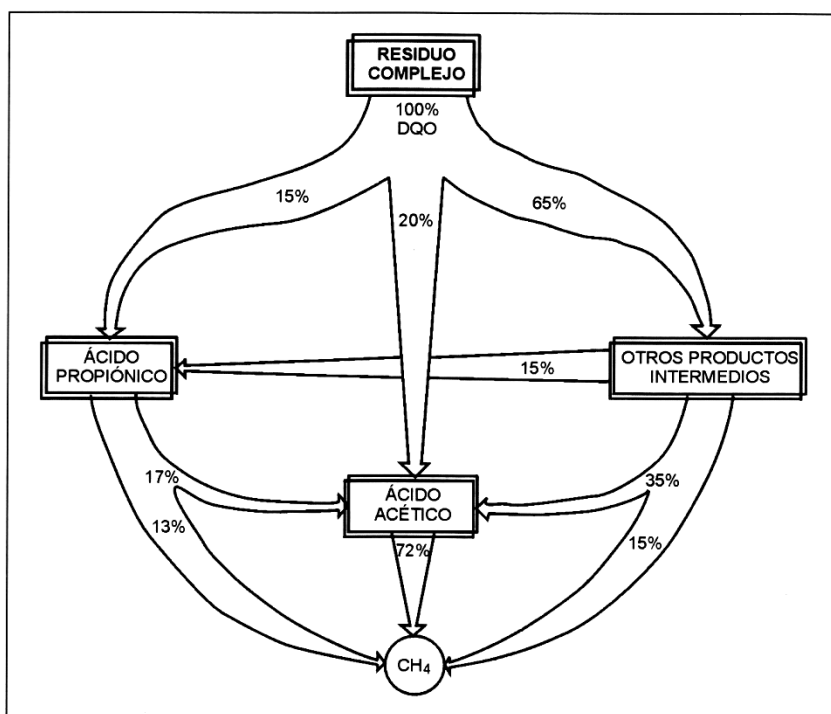


Figura 6. Trayectorias de fermentación de metano, por Romero. J, 2001, *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño*.

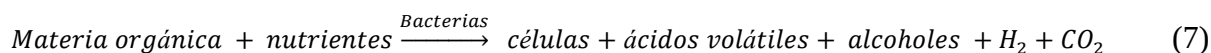
De acuerdo con dicho esquema, aproximadamente un 72% del metano formado proviene de la descomposición del acetato por las bacterias acetoclásticas, un 13% del ácido propiónico y un 15% de otros productos intermedios. Los porcentajes reales serán, posiblemente, diferentes para distintos residuos; sin embargo, la mayor parte del metano producido provendrá de la fermentación del ácido acético, el cual es el ácido predominante en la fermentación de carbohidratos, proteínas y grasas. Por otra parte, el ácido propiónico se forma principalmente durante la fermentación de carbohidratos y proteínas. Por ello, en el proceso son muy importantes las bacterias que utilizan ácido acético y ácido propiónico.

Entre las principales bacterias no metanogénicas de digestores anaerobios se encuentran: *Clostridium spp.*, *Peptococcus anaerobus*, *Bifidobacterium spp.*, *Desulphovibrio spp.*, *Corynebacterium spp.*, *Lactobacillus*, *Actinomyces*, *Staphylococcus* y *Escherichia coli*.

Las bacterias metanogénicas son semejantes a las encontradas en el estómago de animales rumiantes y sedimentos de lagos y ríos; los géneros principales son *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanosarcina* y *Methanobacillus*. Todas las bacterias metanogénicas son de crecimiento muy lento y, por lo tanto, el tiempo de retención celular debe ser lo suficientemente largo para permitir su crecimiento e

impedir su extracción del sistema. Por lo regular se mencionan tiempos de retención celular de 2 a 20 días, con pH de 6.8 a 7.4, y se considera que la fermentación metanogénica controla la tasa del proceso. (Romero, 2001, pág. 238).

Las ecuaciones que resumen el proceso anaerobio, incluyendo crecimiento, serían:



Para que un proceso de fermentación se realice en forma normal y vital es preciso contar con la acción conjunta y combinada de bacterias que producen metano y las que no lo producen. El exceso o falta de cualquier grupo de bacterias y su función más o menos activa o inactiva, tienden a destruir el equilibrio cinético, lo que lleva a la anormalidad o incluso el fracaso del proceso de fermentación.

Microorganismos que no producen metano.

Son una serie de microorganismos que convierten complejos productos orgánicos en compuestos de moléculas más sencillas y más pequeñas. Participan numerosos y variados microbios anaeróbicos y facultativos, dependiendo su número y su variedad de los materiales de fermentación.

Los microorganismos que no producen metano pueden clasificarse en tres grupos, bacterias, mohos y protozoos, entre los cuales tienen mayor importancia los primeros.

Bacterias: Hay muchos tipos de bacterias que no producen metano. Sobre la base de sus grupos fisiológicos, se clasifican las bacterias no metanogénicas en siete grupos: Las que descomponen la celulosa, la semi-celulosa, las proteínas y las grasas, las que producen hidrógeno, otros microbios específicos como los Thiovibros y las que emplean el ácido láctico.

Mohos: Mediante el cultivo artificial se han aislado numerosos mohos y levaduras en la digestión anaeróbica, llegándose a la conclusión que estos organismos podrían participar en el proceso de la digestión, del cual obtendrían los nutrientes para producirse.

Protozoos. Algunos investigadores han señalado que los protozoos también intervienen en este proceso, tratándose principalmente de Plasmodium, flagelados y amebas, aunque consideran que podrían desempeñar un papel de menor importancia en el proceso.

En la digestión anaeróbica la mayoría de las bacterias son no metanogénicas, y tienen una gran importancia en el desarrollo del proceso anaeróbico, ya que las bacterias productoras de biogás no pueden aprovechar directamente los compuestos orgánicos a menos que éstos hayan sido degradados y convertidos en compuestos más sencillos, de menor peso molecular, gracias a la acción de las bacterias no metanogénicas. (A. Guevara, 1996, pág. 12).

Microorganismos productores de Metano.

Conforman el grupo más importante de microorganismos de fermentación en la fabricación del biogás.

Estas bacterias se caracterizan por ser muy sensibles al oxígeno y a los ácidos, solo pueden usar como sustrato los compuestos orgánicos e inorgánicos más sencillos. El crecimiento y reproducción de las bacterias metanogénicas es muy lento. Duplicar su población demora de 4 a 6 días. Su estudio ha avanzado muy lentamente por la dificultad de aislar, incubar y almacenarlos. (A. Guevara, 1996, pág. 14).

Hasta ahora se han descubierto pocas especies puras de metanobacterias, las cuales se indican en la tabla 6.

Tabla 6
Clasificación de las metanobacterias

Orden	Familia	Género	Especies
Methanobacteriates	Methanobacteriaceae	Methanobacterium	Methanoformicum
			Methanobryantil
			M. thermoautotrophic
			Methanoruminantium
			Methanoarboriphilus
			Methanosmithil
Methanococcales	Methanococcaceae	Methanocoecus	Methanovannielii
			Methanovoltae
Methanomicrobiates	Methanomicrobiaceae	Methanogenium	Methanocaraci
			Methanomarisipigri
		Methanospillum	Methanohongatei
		Methanomicrobium	Methanomobile
	Methamisarcinaceae	Methanosarcina	Methanobarkerie

Fuente: Guevara, A. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos. (1996).

Los principales productos de la fermentación ácida, como los ácidos volátiles orgánicos, los cuales son, a la vez, la fuente de formación de metano, se incluyen en la tabla 7.

Tabla 7

Principales productos de la fermentación ácida

Ácidos Volátiles	Composición Química
Ácido fórmico	HCOOH
Ácido acético	CH ₃ COOH
Ácido propiónico o láctico	CH ₃ CH ₂ COOH
Ácido butírico	CH ₃ CH ₂ CH ₂ COOH
Ácido valérico	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ COOH
Ácido isovalérico	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ COOH
Ácido caproico	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ COOH
Otros Productos	
Hidrógeno	H ₂
Dióxido de carbono	CO ₂
Metanol	CH ₃ OH
Metilamina	(CH ₃) ₃ N

Fuente: Romero, J. Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño. (2001).

Producción de metano.

Uno de los parámetros que permite evaluar la generación de metano a partir del proceso de fermentación de la materia orgánica es la productividad de metano.

Sogari (2003) sostiene que “este parámetro se define como la cantidad de metano generado en la unidad de tiempo respecto de la materia dispuesta en el reactor” (p. 1).

La expresión matemática que permite calcular la productividad de metano en un tiempo determinado, es la siguiente.

$$P_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{V_{reactor} * t} \quad (9)$$

Donde:

P_{CH_4} Producción de metano; V_{CH_4} volumen de metano generado; $V_{reactor}$ volumen de materia dispuesta en el recinto fermentador; t tiempo considerado.

La producción de metano tiene un límite y este depende fundamentalmente de la naturaleza de la materia dispuesta en el digester. De acuerdo con Sogari (2003), la ecuación que permite estimar la máxima generación de metano para un producto determinado, es la siguiente:

$$M_{max} = \frac{V_{CH_4}}{S_{org\ total}} \quad (10)$$

Donde:

M_{max} Máxima generación de metano; V_{CH_4} volumen de metano generado; $S_{org\ total}$ cantidad de materia orgánica total utilizada en todo el proceso.

Crecimiento biológico anaerobio.

Una de las ventajas más importantes del proceso anaerobio es su baja tasa de síntesis o bajo porcentaje de conversión de materia orgánica en células biológicas, minimizando los problemas de disposición de lodos. En la figura 7, se observa el crecimiento biológico resultante del tratamiento anaerobio de diferentes tipos de residuos, que presentan los dos extremos del crecimiento: residuos ácidos grasos, los cuales producen el mínimo crecimiento, y los carbohidratos, que genera la máxima cantidad de crecimiento.

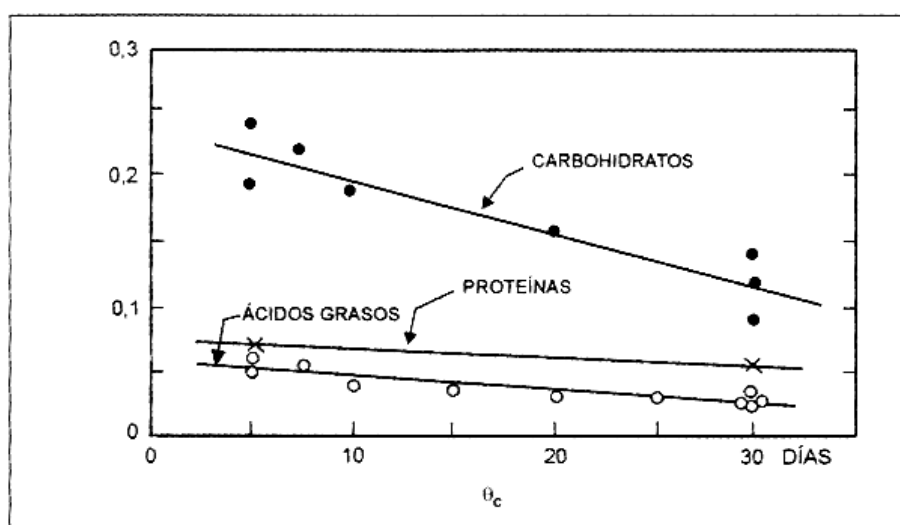


Figura 7. Crecimiento biológico anaerobio, por Romero. J, 2001, *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño*.

Aspectos Comparativos.

La energía obtenida por transferencia de electrones en el proceso aerobio es mucho mayor que en el proceso anaerobio, razón por la cual este produce menos biomasa, por consiguiente esto hace más difícil mantener poblaciones microbiales grandes en condiciones anaerobias.

En las tablas 8 y 9, se resumen las ventajas y desventajas de los procesos anaerobio y aerobio respectivamente.

Tabla 8

Ventajas y desventajas del proceso anaerobio

Ventajas	Desventajas
- Tasa baja de síntesis celular y, por consiguiente, poca reducción de lodos. - El lodo producido es razonablemente estable y pueden secarse y disponerse por métodos convencionales. - No requiere oxígeno. Por tanto, usa poca energía y es especialmente adaptable a residuos de alta concentración orgánica. - Produce metano, el cual puede ser útil como energético. El metano tiene un valor calorífico de aproximadamente 36,500 kJ/m³. El biogás de los digestores y un valor calórico contiene aproximadamente un 65% de metano y un valor calórico de 22,400 kJ/m³.	- Para tener grados altos de tratamiento requiere temperaturas altas. - El medio es corrosivo tiene riesgos de salud por H₂S. - Exige un intervalo de operación de pH bastante restringido. - Requiere concentraciones altas de alcalinidad. - Es sensible a la contaminación con oxígeno.

Fuente: Romero, J. Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño. (2001).

Tabla 9
Ventajas y desventajas del proceso aerobio

Ventajas	Desventajas
- Ausencia de olores - Mineralización de todos los compuestos biodegradables	- Tasa alta de síntesis celular y, por consiguiente, alta producción de lodos. - Requiere mucha energía eléctrica para oxigenación y mezcla. - Gran proporción de células en los lodos que hace, en algunos casos, necesaria su digestión, antes de secarlos y disponerlos.

Fuente: Romero, J. Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño. (2001).

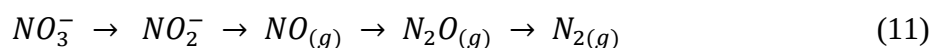
Proceso Anóxico.

La fermentación anóxica o proceso de respiración de nitrato está definida como el conjunto de reacciones de reducción de nitrato o nitrito, en las cuales éstos se utilizan como captadores de electrones, en ausencia de oxígeno libre.

El proceso también se conoce como desnitrificación anaerobia, pero como las vías principales de conversión bioquímica no son anaerobias sino una modificación de las vías aerobias, se ha considerado más apropiado denominarlo proceso anóxico. La única diferencia entre la respiración aerobia y la anóxica radica en la enzima que cataliza la transferencia final de electrones.

Para promover la desnitrificación se debe excluir el oxígeno; de lo contrario, si existen simultáneamente oxígeno y nitrato, los microorganismos prefieren el oxígeno como aceptador de electrones. Una concentración de oxígeno disuelto de 0.1 a 0.2 mg/L tiene efectos inhibitorios del proceso. (Romero, 2001, págs. 246, 247)

En la desnitrificación el nitrato es reducido por los microorganismos para obtener energía, en cuatro etapas principales:



Donde:

NO_3^- Nitrato; NO_2^- Nitrito; NO Óxido nítrico; N_2O Óxido nitroso; N_2 Nitrógeno.

Cada etapa involucra una enzima reductora que cataliza la transferencia de electrones al nitrógeno, los cuales se originan en el sustrato o donador de electrones. Para la desnitrificación sirve como sustrato un residuo orgánico o inorgánico, como por ejemplo el azufre o el hidrógeno. Se conocen alrededor de catorce géneros de bacterias desnitrificantes, la mayoría heterotróficas.

Los grupos citados son *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Methanomonas*, *Paracoccus*, *Spirillum*, y *Thiobacillus*. Las bacterias heterotróficas obtienen el carbono para la síntesis celular de compuestos orgánicos y, generalmente, oxidan los mismos compuestos para producir energía.

Las autotróficas desnitrificantes, como la bacteria *Thiobacillus denitrificans*, oxidan azufre para obtener energía y producen carbono para síntesis celular de CO_2 disuelto o del HCO_3^- .

El proceso de desnitrificación biológica utiliza metanol, etanol, ácido acético y metano como fuente de carbono y nitrato como aceptador final de electrones. (Romero, 2001, pág. 248)

Consideraciones Ambientales de Microorganismos.

En todo proceso biológico, los organismos se desarrollarán de manera apropiada si se les provee, básicamente, lo siguiente:

- Nutrientes suficientes
- Ausencia de compuestos tóxicos
- Condiciones ambientales apropiadas

En su texto Romero (2001) indica: “En general las bacterias requieren, principalmente, carbono, nitrógeno, hidrógeno y oxígeno; en menor proporción fósforo, azufre, potasio, calcio, hierro y magnesio, y como suplemento nutricional cantidades mínimas de zinc y molibdeno” (p. 249).

En los procesos anaerobios debe haber ausencia total de oxígeno.

En todo proceso, la temperatura y el grado de mezcla son factores de gran influencia; además, para asegurar que los microorganismos crezcan se les debe proveer un medio ambiental adecuadamente controlado para garantizar su reproducción y crecimiento.

La actividad metabólica depende de muchos factores ambientales, es decir de las condiciones de vida. Según la especie y tipo de organismo, los factores ambientales aceleran, retardan o inhiben su crecimiento. Por ejemplo: intensidad solar, temperatura, pH, contenido de sólidos disueltos, presión, entre otros factores.

En el tratamiento biológico, las enzimas o catalizadores bioquímicos son necesarios para la descomposición, y su acción es afectada por la temperatura y por el pH. En general, la mayoría de las enzimas requieren pH entre 3.5 y 9.5.

La temperatura es un factor muy importante en la evaluación del rendimiento global de un proceso de tratamiento biológico, pues altera la actividad metabólica de los microorganismos, las tasas de transferencia de oxígeno y las características alimentación de los lodos. La temperatura máxima para la actividad biológica aerobia eficiente es del orden de 38°C. Para el proceso anaerobio, en general, la temperatura óptima entre 32 – 38°C. (Romero, 2001, pág. 250)

El efecto de la temperatura se expresa generalmente por la ecuación:

$$K_T = K_{20}\theta^{T-20} \quad (12)$$

Donde:

K_T tasa de reacción a T °C; K_{20} tasa de reacción a 20°C; θ coeficiente de actividad a la temperatura del sustrato; T temperatura del sustrato en el interior del reactor, °C.

Los valores de θ para procesos biológicos se indican en la tabla 10:

Tabla 10
Valores del coeficiente de actividad a la temperatura

	Intervalo	Típico
Lodos activados	1.00 – 1.08	1.04
Lagunas aireadas	1.04 – 1.10	1.08
Filtros preparadores	1.02 – 1.08	1.035

Fuente: Romero, J. Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño. (2001).

En los procesos anaerobios es muy importante el control del pH porque las bacterias de metano operan solamente en el intervalo de pH 6.0 a 7.5; la sobreproducción de ácidos o la

acumulación de hidrógeno puede disminuir el pH e inhibir la actividad de las bacterias del metano, así como de las productoras de ácidos, deteniendo el proceso, con el desarrollo subsecuente de compuestos indeseables y olorosos.

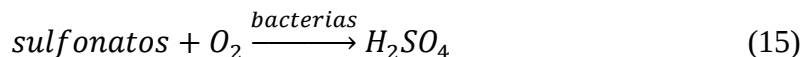
La mayoría de los sistemas biológicos aerobios operan favorablemente con pH entre 6.0 y 8.5; valores superiores, o inferiores, a dichos límites deterioran la eficiencia. Los procesos de nitrificación requieren suficiente alcalinidad para reaccionar con el ion hidrógeno producido. Los cambios en el pH de un proceso de tratamiento de aguas son indicadores del estado o predominio de una actividad o reacción y, por tanto, ayudan a interpretar valores y condiciones del proceso. (Romero, 2001, pág. 252)

Las reacciones de reducción de pH se indican en las ecuaciones 13, 14, 15, 16:

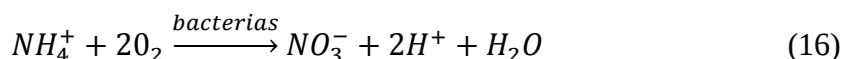
- Destrucción de alcalinidad cáustica por producción bioquímica de CO_2 .



- Oxidación bioquímica de sulfuros.



- Nitrificación.



Factores a considerar en el proceso metanogénico.

Existen diversos factores que influyen directamente en la fermentación metanogénica y son capaces de modificar la rapidez de la descomposición, entre ellos tenemos:

Material de carga para la fermentación.

Llamamos así a todos los residuos orgánicos que se introducen dentro de un biodigestor para su degradación.

Para la fermentación los microorganismos metanogénicos se necesitan nutrientes para producir biogás, por ello es necesario contar con suficiente material de carga para que el

proceso de digestión no se interrumpa. La materia orgánica que se utiliza como material de carga (residuos de los cultivos, excretas animales) pueden dividirse en dos grupos, la materia rica en nitrógeno y materia rica en carbono, el nitrógeno se utiliza como constituyente para la formación de la estructura celular, y el carbono se utiliza como fuente de energía.

Relación Carbono – Nitrógeno (C/N).

Los microorganismos consumen estos elementos en determinada proporción, medidos por la relación carbono – nitrógeno (C/N) que contiene la materia orgánica. Existen muchos criterios en lo referente a esta relación.

Se conoce en general como aceptable una relación C/N de 20 a 30:1.

Las excretas animales son ricas en nitrógeno, con una relación C/N inferior a 25:1, durante la fermentación tienen una mejor velocidad de biodegradación y generación de gas. Los residuos agrícolas son ricos en carbono, con una relación C/N superior a 30:1, pero con una generación más lenta de gas en el proceso de digestión (A. Guevara, 1996, pág. 15)

En la tabla 11, se detalla el contenido de carbono y nitrógeno presente en la materia orgánica.

Tabla 11
Relación carbono - nitrógeno de materia prima

Materia Prima	Contenido de carbono de la materia prima (%)	Contenido de nitrógeno de la materia prima (%)	Relación carbono - nitrógeno
Paja seca de trigo	46	0.53	87:1
Paja seca de arroz	42	0.64	67:1
Tallo del maíz	40	0.75	53:1
Hojas secas	41	1.00	41:1
Hojas frescas	40	0.8	50:1
Viruta, aserrín	48	0.53	91:1
Pasto	14	0.54	27:1
Estiércol de cerdo	7.8	0.60	13:1
Estiércol de aves	41	1.30	32:1
Estiércol vaca	7.3	0.29	25:1
Estiércol caballo	10	0.42	24:1
Residuos de frutos	42	1.06	40:1

Fuente: Guevara, A. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos. (1996).

En general las materias primas ricas en nitrógeno producen más gas que las ricas en carbono.

Según Guevara (1996) “en los primeros 10 días de fermentación la materia prima nitrogenada genera de 34% a 46% del total de gas producido, mientras que la materia rica en carbono aporta el 8% aproximadamente” (p. 16).

Debido a esto para conseguir un buen rendimiento de gas durante la fermentación, es conveniente combinar proporciones adecuadas de materia rica en nitrógeno a la materia de alta relación C/N.

La relación C/N se puede calcular aplicando la siguiente fórmula:

$$K = \frac{C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + \dots}{N_1X_1 + N_2X_2 + N_3X_3 + \dots} = \frac{\sum C_iX_i}{\sum N_iX_i} \quad (17)$$

Donde:

K Relación C/N de la mezcla de materia prima; **C** porcentaje de carbono en la materia prima;

N porcentaje de nitrógeno en la materia prima; **X** peso de materia prima.

Concentración de la carga.

Para la producción de gas, no es conveniente que la carga a descomponer esté muy concentrada ni muy diluida.

Guevara (1996) “recomienda una concentración de 5 a 10%. Sobre la base de los sólidos totales de la carga pueden calcularse la concentración de los lodos” (p. 16).

La cantidad de agua que se agregará y las proporciones de los componentes se muestran en la tabla 12.

Tabla 12
Contenido de sólidos

Material	Contenido seco (%)	Contenido hídrico (%)
Paja de arroz	83	17
Paja de trigo seca	82	18
Tallo de maíz	80	20
Pasto verde	24	76
Estiércol de vaca	17	83
Estiércol de cerdo	18	82

Fuente: Guevara, A. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos. (1996).

La temperatura.

Es uno de los factores que tiene mayor relevancia en el proceso anaeróbico, es visto como el factor en potencia para aumentar la eficiencia de los sistemas.

Guevara (1996) sostiene que “la temperatura afecta el tiempo de retención para la digestión y degradación del material dentro del digestor, la degradación se incrementa en forma geométrica con los aumentos de la temperatura de trabajo, además se incrementa la producción de gas” (p. 18).

Valor del pH.

El valor óptimo para la digestión metanogénica es de 6,0 – 7,5, cuando baja de 5 o sube de 8 puede inhibir el proceso de fermentación o incluso detenerlo. Normalmente cuando se trabaja con residuos domésticos y agropecuarios, la dinámica del mismo proceso ajusta el pH.

El pH se puede corregir en forma práctica, de la siguiente manera:

Sacando frecuentemente una pequeña cantidad de efluente y agregando materia prima fresca en la misma cantidad y en forma simultánea. Cuando el pH es bajo se puede agregar fertilizante, cenizas, agua amoniacal diluida o una mezcla de ambos y licor fermentado.

Promotores e inhibidores de la fermentación.

Los promotores son materiales que pueden fomentar la degradación de la materia orgánica y aumentar la producción de gas; entre ellos tenemos enzimas, sales orgánicas, se puede

emplear urea, carbonato de calcio (CaCO_3). Los inhibidores, son aquellos factores, que inhiben la actividad vital de los microbios. Cuando se carga el digestor, es útil agregar celulosa para promover el proceso y la producción de gas.

La Urea y el carbonato de calcio han permitido obtener buenos resultados. El primero acelera la producción de metano y la degradación del material, el segundo es útil para la generación de gas y para aumentar el contenido de metano en el gas.

En relación a los inhibidores, son muchos los factores que afectan la actividad de los microorganismos. La alta concentración de ácidos volátiles, más de 2000 ppm en la fermentación mesofílica¹⁰ y de 3600 ppm para la termofílica¹¹.

La excesiva concentración de amoníaco y nitrógeno, destruyen las bacterias, todo tipo de productos químicos agrícolas, en especial los tóxicos fuertes aún en ínfimas proporciones podrían destruir totalmente la digestión normal. (A. Guevara, 1996, pág. 20).

Muchas sales como los iones metálicos son fuertes inhibidores, dentro de los cuales se pueden mencionar algunos en la tabla 13.

Tabla 13
Concentración inhibidora de inhibidores comunes

Inhibidores	Concentración Inhibidora
SO_4	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
Nitrato (Según contenido de nitrógeno)	0.05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200 – 500 mg/l
Na	3500 – 5500 mg/l
K	2500 – 4500 mg/l
Ca	2500 – 4500 mg/l

Fuente: Guevara, A. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos. (1996).

Biodigestores.

Guevara (1996) sostiene que “la base fundamental para que se cumpla la digestión anaeróbica es la de mantener la suficiente cantidad de lodos dentro del reactor, para que al entrar en

¹⁰ Fermentación mesofílica. Temperatura que va de 28 a 35°C, la descomposición de la carga es más lenta y con menos consumo de energía.

¹¹ Fermentación termofílica. Temperatura de 51 a 55°C, se caracteriza por una digestión rápida, alto rendimiento de gas y un corto tiempo de retención.

contacto con el material de carga, las bacterias que existan en ellos puedan ayudar a la fermentación y degradación de la materia orgánica”(p. 25).

La producción de biogás por descomposición anaeróbica es un modo considerado útil para tratar residuos biodegradables ya que produce un combustible de valor, además de producir un efluente que puede usarse como un abono rico en nutrientes.

Un digestor de residuos orgánicos o biodigestor es, un contenedor hermético e impermeable también llamado reactor, dentro del cual es depositado el material orgánico a fermentar, ya sean desechos vegetales, excrementos de animales, etc., en una determinada dilución de agua para su descomposición, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio.

Este sistema también puede incluir una cámara de carga y nivelación del agua residual antes del reactor, un dispositivo para captar y almacenar el biogás y cámaras de presión hidrostática y postratamiento (filtro y piedras, de algas, secado, entre otros) a la salida del reactor. (Pérez, 2010, pág.18)

De acuerdo con Androvetto (2003) “los biodigestores convencionales son utilizados generalmente para tratar sustratos concentrados con alto contenido de sólidos como los desechos porcinos y materiales orgánicos, que se degradan con tiempos de retención superiores a 20 días.” (p. 20).

Los digestores anaerobios son más sencillos en su concepción, y ampliamente utilizados en las plantas de biogás agroindustrial. Se trata habitualmente de digestores cilíndricos verticales, contruidos en hormigón, suelen predominar digestores con capacidad no superior a 2500 m³ para mantener más fácilmente la homogeneidad de la biomasa así como la temperatura.

La alimentación de sustrato al digestor puede ser continua, semicontinua o discontinua, aunque lo más habitual suele ser alimentación semicontinua o continua. Suele aplicarse a procesos de digestión por vía húmeda. Asimismo estos digestores pueden operar con recirculación.

Un punto a destacar es que en estos digestores no hay fijación de la biomasa, es decir, los microorganismos abandonan el digestor junto con el material digerido. (Pascual, 2011, pág. 30)

Características del digestor.

Una de las características importantes es la de retener dentro del tanque los microorganismos responsables de llevar a cabo la digestión anaerobia.

El área ocupada por el sistema es reducida, y no necesita equipamiento electromecánico, además de producir energía en forma de gas metano.

Para una buena operación, es necesario que el digestor reúna las siguientes características:

- Hermético, para evitar fugas del biogás o entradas de aire.
- Térmicamente aislado, para evitar cambios bruscos de temperatura.
- El contenedor primario de gas deberá contar con una válvula de seguridad.
- Deberán tener acceso para mantenimiento.

Componentes de un biodigestor anaeróbico.

Los principales componentes de un biodigestor anaeróbico lo constituyen un reactor o contenedor de las materias primas a degradar; un contenedor de gas, con los accesorios para salida de biogás, entrada o carga de materia orgánica prima y salida o descarga de materia orgánica estabilizada. En la figura 8, podemos observar los principales componentes de un biodigestor.

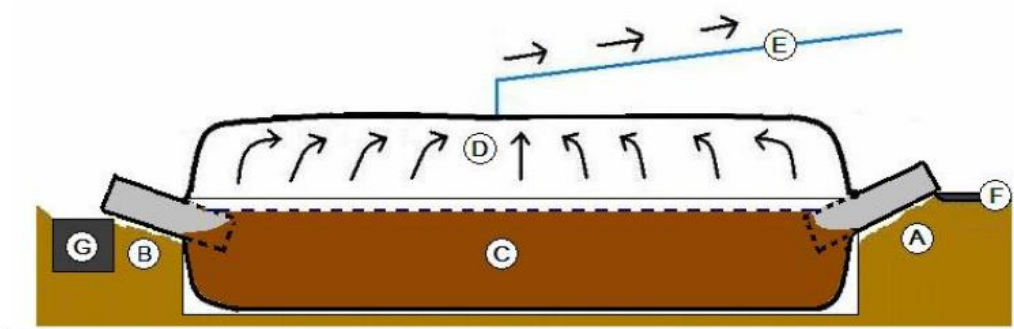


Figura 8. Componentes de un biodigestor horizontal, por CEDECAP, 2007, *Biodigestores de polietileno: Diseño y Construcción*.

A: Entrada del afluyente. Normalmente, el afluyente se introduce por la parte superior del digestor y el sobrenadante se extrae por el lado contrario.

B: Salida del efluente. Generalmente existe una salida de sobrenadante, con un único tubo con válvulas, para la extracción del mismo.

C: Reactor. Corresponde al dispositivo principal donde ocurre el proceso bioquímico de degradación de la materia orgánica. Los reactores de digestión pueden tener forma cilíndrica, cúbica, ovoide o rectangular, aunque la mayor parte de los tanques que se construye en la actualidad son cilíndricos. El suelo del reactor está inclinado, para que el material inorgánico sedimentable y la fracción pesada del afluente puedan ser extraídos del tanque.

D: Cámara de colección de gas. Habitualmente, la parte superior del digestor, llamada, cámara, domo, cúpula o campana de gas, se utiliza para almacenar el biogás que se genera. En algunos casos, está separada del digestor y se le llama gasómetro.

E: Tubería de salida del gas. Se puede definir como la tubería por la cual es conducido el biogás generado en el interior del reactor.

F: Recipiente de entrada para la carga. Es el lugar donde se coloca la materia previamente diluida y balanceada de acuerdo al tipo de compuestos orgánicos, para ser introducida en el reactor del biodigestor.

G: Recipiente de recolección de Biol. Se localiza después de la salida del efluente, es el encargado de almacenar los lodos degradados por las bacterias luego de la producción de biogás.

Tipos de biodigestores.

Digestor esférico.

El digestor esférico, como se muestra en la figura 9, consta de los siguientes elementos:

Un depósito cónico donde el afluente es decantado y calentado por serpentines de agua adosados a las paredes, provisto de un mecanismo de desagüe manual y un orificio de acceso para la limpieza.

Un depósito esférico o digestor propiamente, en el que un agitador manual, tipo tornillo de Arquímedes que remueve los fangos y homogeniza la masa y la temperatura del efluente; tiene el inconveniente, sin embargo, de carecer, de

calentadores adicionales y la ventaja de ser bastante económico; la cavidad esférica se encuentra muy preservada del exterior con una espesa capa de aislante térmico.

Un estanque de decantación de los fangos, que sirven al mismo tiempo como abono para cultivo de algas y posteriormente como materia orgánica del influente.

El digestor pertenece al tipo denominado de proceso continuo y está construido con hormigón y diversos materiales de fibra de vidrio; está provisto de un motor eléctrico que hace girar el agitador que homogeniza el efluente. Las hélices en forma de tornillo de Arquímedes trituran el efluente y lo hacen ascender a través de un conducto en forma de un cilindro. El gas metano producido es conducido a los tanques de almacenamiento por medio de una tubería provista de una llave reguladora, un termómetro y un medidor de presión. (García, 2009, pág. 28)

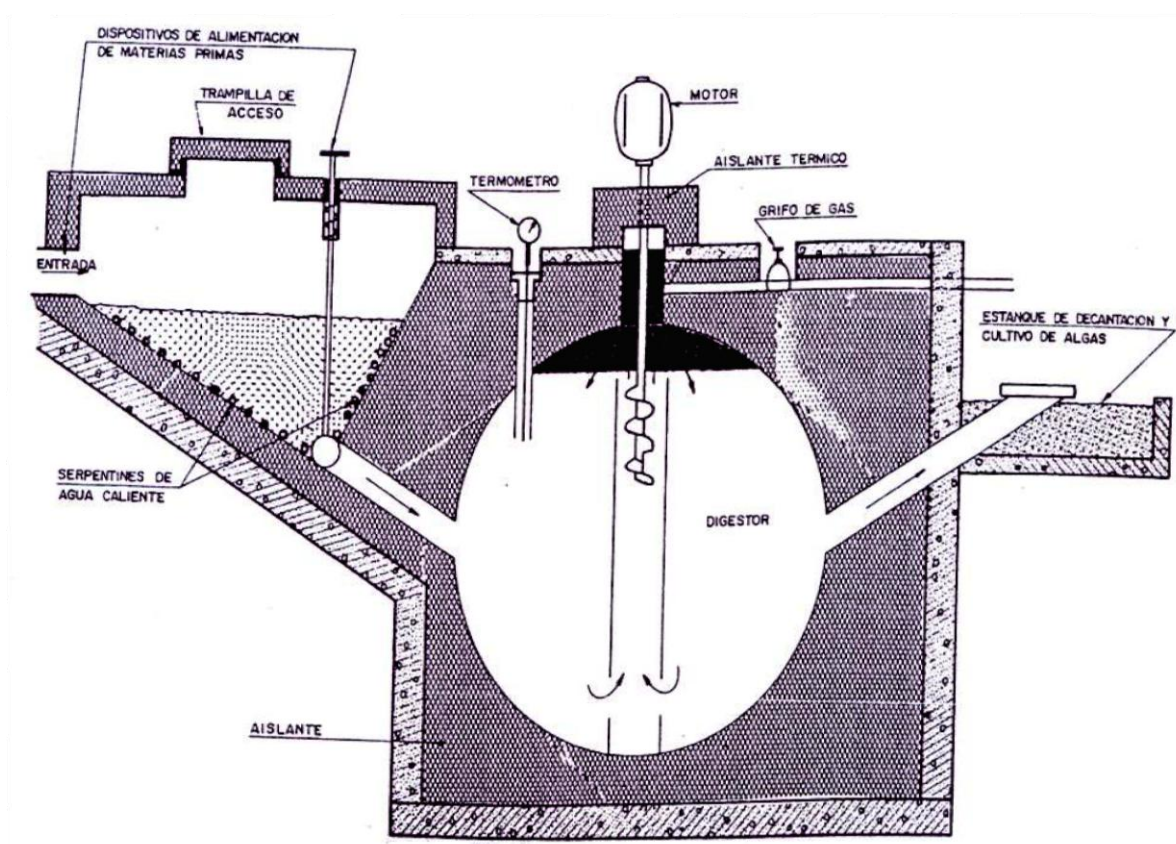


Figura 9. Biodigestor esférico, por García. J, 2009, *Energía Verde*.

Digestor elipsoidal o cilíndrico.

Para procurar que las instalaciones de gas metano resulten lo más económicas posibles es conveniente emplear en su construcción todos aquellos elementos, tuberías y depósitos estandarizados y que por lo tanto, sean fáciles de hallar en el mercado.

Los componentes más usuales son los recipientes de fibra de vidrio, pero los depósitos de acero se fabrican en dimensiones muy variadas y, aunque resultan más caros son más

duraderos, cierran herméticamente y admiten mayor presión, tanto de los líquidos que contienen en su interior como de la tierra que los cubre.

Los aislamientos de los digestores pueden estar formados por una variada gama de materiales; los más baratos se fabrican con compuestos de paja, aserrín, lana de cordero, aunque los más duraderos y no atacables por la humedad proceden de lana de vidrio y polietileno.

El digestor consta de un decantador primario provisto de un desagüe manual, un serpentín de agua caliente, un termómetro para verificar la temperatura de entrada y una trampilla utilizada para la limpieza de los residuos.

En el digestor se remueve el efluente por medio de un pequeño motor provisto de hélice tipo Arquímedes, la cual hace ascender a los sólidos más densos situados en el fondo, consiguiendo homogenizar la masa. Lindando con el digestor un depósito adosado, sirve para que se decanten los fangos activados, que pueden ser extraídos al exterior para su posterior utilización como abono; el sistema posee también un rebosadero que mantiene el nivel del líquido a la altura conveniente, permitiendo al gas ocupar la parte superior del recipiente desde donde es enviado al lugar de almacenaje o consumo. (García, 2009, pág. 31)

Digestores de hormigón de funcionamiento continuo.

En este tipo de biorreactores, el fondo de los depósitos actúa como digestor y tiene forma tronco-cónica, concentra los fangos depositados, consiguiendo de esta manera que el agitador helicoidal actúe más intensamente sobre los residuos sólidos, como se observa en la figura 10.

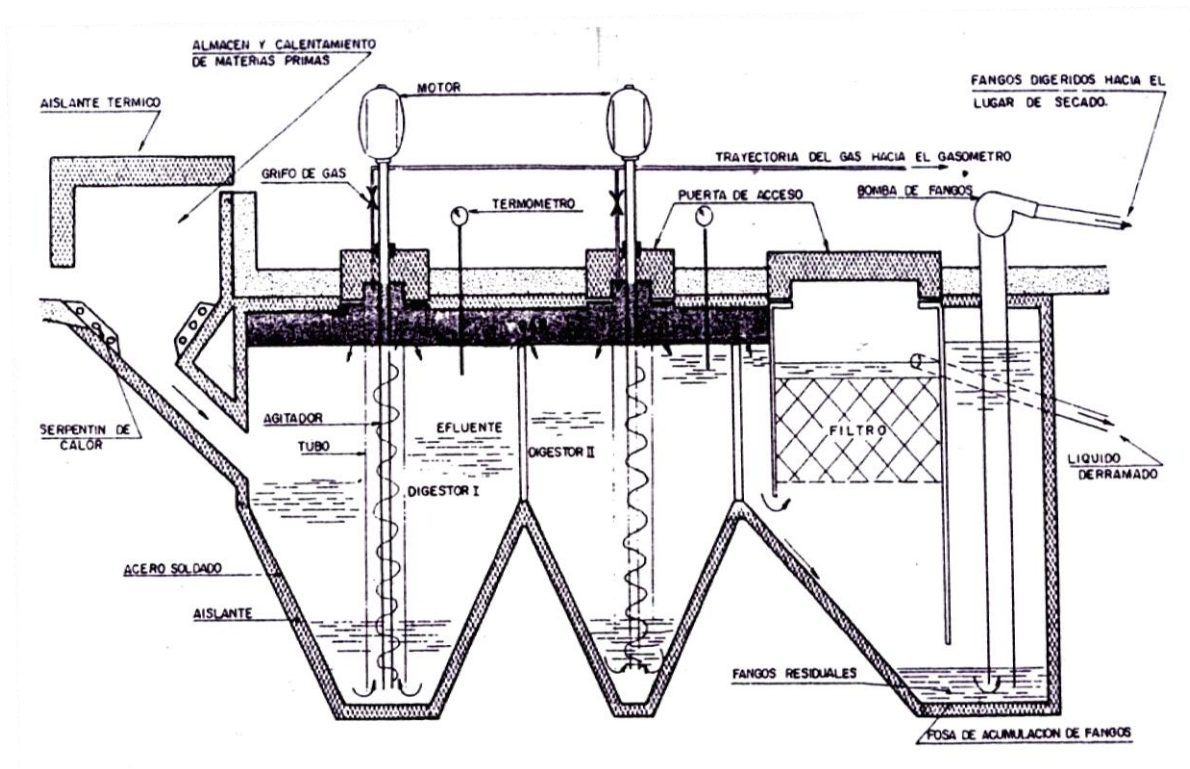


Figura 10. Digestor de hormigón de funcionamiento continuo por García. J, 2009, *Energía Verde*.

El sistema denominado de proceso continuo contiene, tres compartimientos, dentro de los cuales constan dos cámaras digestoras y un tercer compartimiento que es el encargado de recoger los fangos residuales que posteriormente mediante bombeo son extraídos. El líquido pasa por un proceso de purificación a través de un filtro de arena antes de ser utilizado para riego o vertido a ríos. Esta instalación de gas biológico consta de un depósito provisto de serpentines de agua caliente, donde son introducidos las materias vegetales, abonos, algas, etc.; mantener un balance en la mezcla de sustancias es indispensable si lo que se trata es conseguir un efluente de gran riqueza en metano.

Para que la relación entre el carbono y el nitrógeno no oscile entre 25 y 30 es necesario estudiar detalladamente los porcentajes en que entran a formar parte diversos componentes.

Los agitadores situados en el primer y segundo digestor pueden ser de tipo helicoidal, que remueven la mezcla verticalmente o agitadores dilaceradores horizontales, que lo hacen en sentido horizontal; generalmente, son accionados mediante motores eléctricos o de forma manual (pedales, volantes, manivelas, entre otros).

La forma de remover el efluente adquiere gran importancia, ya que según se realice se evita la formación de costras que pueden ser muy perjudiciales para el proceso de obtención de metano.

Las sustancias nutritivas como vegetales, abonos, excrementos y algas, son introducidas en proporciones adecuadas para que se cumpla la relación óptima ($25 < C/N < 30$), sin desestimar el equilibrio del resto de los componentes como el fósforo, azufre, calcio, magnesio, potasio, zinc y hierro. (García, 2009, pág. 35)

Para lograr obtener un pH que esté comprendido entre 7 y 8 se debe procurar una adecuada homogenización de la mezcla, es decir que se encuentre diluida en agua y que los sólidos estén bien troceados, esto se logra gracias a la acción del agitador de hélice; debe notarse que si el efluente es muy ácido, la producción de gas no será la esperada.

Está demostrado que en el proceso intervienen dos tipos de bacterias que viven en simbiosis; el primer grupo denominado bacterias ácidas, que descomponen los desechos orgánicos transformándolos en ácido butírico y acético, mientras que el segundo grupo muy alcalino convierte los ácidos orgánicos en gas metano y CO_2 .

En este proceso se absorbe el oxígeno y el hidrógeno, como consecuencia la masa orgánica disminuye de volumen.

La biomasa es difícil de descomponer, debido a que en su composición abundan las materias fibrosas, su descomposición se ralentizará y será necesario controlar el pH y añadir materias ácidas para que las bacterias del primer grupo proliferen y hagan su papel preparando el camino a las bacterias productoras de metano. (García, 2009, pág. 35)

Sistemas de agitadores por bombeo y calentadores de serpentín.

En esta clase de sistemas de agitadores por bombeo, el tornillo helicoidal de Arquímedes es sustituido ventajosamente por un sistema de reciclaje de lodos por bombeo.

El gas producido se acumula en la parte superior del depósito y posteriormente es trasladado a un gasómetro, siendo antes purificado o depurado por burbujeo y filtraje. Es muy importante evitar que el gas no se mezcle con el aire para evitar los riesgos de una explosión y poder llevar un control de presión de gas.

Este tipo de instalación de gas biológico se encuentra ya muy perfeccionada; por un lado, los agitadores de hélices han sido sustituidos por un sistema de tuberías provistas de bombas eléctricas que absorben el efluente y lo distribuyen en los depósitos; estos digestores contruidos con materiales aislantes y fibra de vidrio están provistos de serpentines de agua caliente que mantienen la temperatura adecuada para cada momento del proceso. (García, 2009, pág. 37)

Siempre y cuando la temperatura del proceso sea mayor o igual a 35 °C, el proceso de obtención de metano será más rápido, de hecho el proceso de degradación de la materia comienza cuando el efluente se encuentra a una temperatura de 12 °C, sin embargo, un rendimiento óptimo se alcanza al llegar a los 35 °C y no exceder los 45 °C. Por lo tanto, se recomienda llevar un control preciso de temperatura procurando que ésta no descienda bruscamente, ya que una oscilación de ± 3 °C supone la ralentización momentánea del proceso de digestión.

Cuando se almacenan las materias primas, en un depósito previo a la entrada de los digestores, hay que procurar que la biomasa, convenientemente troceada y diluida, se encuentre a una temperatura lo suficientemente elevada para que al ser introducida en las cámaras de digestión no afecte a las bacterias termófilas, que al ser anaerobias no soportan las burbujas de aire ni de oxígeno ni los cambios bruscos de temperatura.

Es necesario, por tanto, crear depósitos provistos de materiales aislantes y diluir las materias primas con agua caliente, sobre todo cuando la temperatura ambiente es más bien baja; a veces, para lograr el aislamiento térmico del efluente se realiza la operación de mezclado, trituración y dilución en tanques situados en el interior de invernaderos, y en casos muy especiales se utiliza el calor que proporcionan los manantiales geotérmicos o el agua procedente de la refrigeración de las centrales energéticas. (García, 2009, pág.39)

En este tipo de procesos, más industrializados el control de temperatura del proceso de digestión se encuentra regulado automáticamente por una serie de termostatos y sensores diferenciales que ayudan a mantener el agua de los serpentines entre los 35 °C y 40 °C, evitando sobrepasar los 45 °C.

Sistema batch o discontinuo.

Los sistemas discontinuos se cargan una sola vez en forma total y la descarga se efectúa una vez que se ha dejado de producir gas combustible. Normalmente consiste en tanques herméticos con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás.

Este sistema es aplicable cuando la materia a procesar está disponible en forma intermitente. En este tipo de sistemas se usa una batería de digestores que se cargan a diferentes tiempos para que la producción de biogás sea constante. Este tipo de digestor es también ideal a nivel de laboratorio si se desean evaluar los parámetros del proceso o el comportamiento de un residuo orgánico o una mezcla de ellas.

De los sistemas batch, el más utilizado es el OLADE-GUATEMALA, por la facilidad de construcción del sistema y la sencillez en el proceso de degradación en comparación con los modelos chino e hindú. La alimentación del digestor puede ser con residuos vegetales o también mezclando residuos vegetales con pecuarios. (Torres, 2009, pág. 14)

En la figura 11, podemos observar un sistema batch o discontinuo.

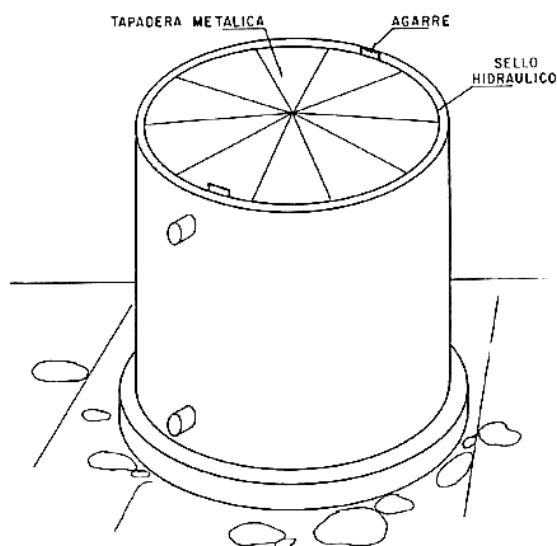


Figura 11. Digestor tipo Olade-Guatemala por Torres. D, 2009, Desarrollo de un Sistema de Biodigestores y Energías Limpias.

Sistema Horizontal.

Estos digestores se construyen generalmente enterrados, son poco profundos y alargados, semejando un canal. Se operan a régimen semi continuo, entrando la carga por un extremo del digestor y saliendo los lodos por el extremo opuesto. La cúpula puede ser rígida o de algún material flexible que no permita fugas de gas y que resista las condiciones de la intemperie.

Este tipo de digestores se recomiendan cuando se requiere trabajar con volúmenes menores, para los cuales, la excavación de un pozo vertical resulta ser una problemática.

En la figura 12, podemos observar el esquema de un biodigestor horizontal.

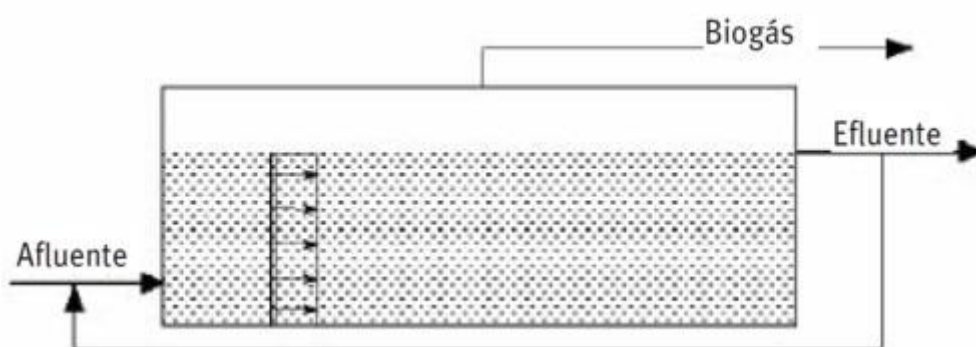


Figura 12. Biodigestor horizontal por Torres. D, 2009, *Desarrollo de un Sistema de Biodigestores y Energías Limpias*.

Parámetros de Diseño.

Este tipo de digestor tiene aspectos a favor como el tipo y disponibilidad de materia prima y la vida útil, además posee un tiempo de retención que va desde los 30 hasta los 60 días, lo cual es muy aceptable, por tales razones se ha elegido este modelo para su construcción.

El presente diseño tendrá una capacidad de trabajo de 8kg aproximadamente. La materia a emplearse será estiércol de cerdo y paja de arroz seca, ya que estos dos elementos poseen buenas características para este proceso.

Los parámetros de diseño para un biodigestor de estas características se los presentan a continuación.

Volumen del biodigestor.

Un dato importante es conocer que el estiércol contiene un porcentaje considerable de agua, el cual oscila entre 80 – 90%, es por ello que se puede asumir que 1 Kg de estiércol equivaldría a 1 litro de agua.

En este caso la relación Estiércol – agua es de 1:1; por lo que la cantidad de sustrato que ingresa al digestor es la suma de agua más el estiércol.

El volumen del digestor se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_D = E * TR * F_D \quad (18)$$

Donde:

V_D Volumen del digestor en m^3 ; E cantidad de estiércol que ingresa al digestor; TR tiempo de retención en días; F_D Factor de dilución del residuo.

El factor de dilución depende del tipo de sustrato. Como ejemplo se tiene que con una relación Estiércol – agua 1:1 el factor de dilución sería $F_D = 1 \text{ estiércol} + 1 \text{ agua} = 2$; como lo indica la tabla 14.

Tabla 14
Relación estiércol – agua para diferentes tipos de fuentes

Animal	Relación Estiércol – Agua
Porcino	1:1
Aves	1:1
Equino	1:1-3

Fuente: Chungandro, K & Manitio, G. Diseño y construcción de un biodigestor para pequeñas y medianas granjas. (2010)

Para realizar el cálculo correspondiente se considerará que 1kg de estiércol equivale aproximadamente a 1 litro de agua. Entonces, aplicando la ecuación 18 se tiene:

$$E = 8 \text{ kg/día}$$

$$F_D = 2$$

$$TR = 50 \text{ días}$$

$$V_D = 8 \frac{\text{kg}}{\text{día}} * 2 * 50 \text{ días} * \frac{1 \text{ litro}}{1 \text{ Kg}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ litros}}$$

$$V_D = 0.8\text{m}^3$$

El cálculo del volumen V_D se basa en el tiempo de retención del sustrato en el interior del digestor.

Cálculo del volumen real del reactor.

Para efectos del llenado del reactor con la materia orgánica es recomendable que la materia líquida ocupe aproximadamente un 70% del volumen total y el restante 30% sea ocupado por el gas, este volumen restante sirve como un gasómetro integrado al contener el biogás. El volumen que contiene el sustrato se lo calcula de la siguiente manera:

$$V_D = V_L = 0.8\text{m}^3 = 70\%$$

$$V_c = V_L * \frac{0.3}{0.7} \quad (19)$$

Donde:

V_c Volumen de la campana o gasómetro; V_L Volumen del líquido.

Entonces reemplazando los valores se obtiene:

$$V_c = 0.8\text{m}^3 * \frac{0.3}{0.7}$$

$$V_c = 0.34\text{m}^3$$

Tenemos que el volumen real del digestor (V_{DR}) será:

$$V_{DR} = V_c + V_D$$

$$V_{DR} = 0.34\text{m}^3 + 0.8\text{m}^3$$

$$V_{DR} = 1.14\text{m}^3$$

Para calcular la profundidad del digestor (L_D), se lo realiza de la siguiente forma:

$$V_{DR} = A_D * L_D \quad (20)$$

$$A_D = L_1 * L_2 \quad (21)$$

Reemplazando las ecuaciones tenemos:

$$L_D = \frac{V_{DR}}{L_1 * L_2} \quad (22)$$

Donde:

V_{DR} Volumen del digestor; A_D área del digestor; L_D longitud del digestor.

Reemplazando los valores en la ecuación 22, tenemos lo siguiente:

$$L_D = \frac{1.14m^3}{1m^2}$$

$$L_D = 1.14m$$

Volumen del tanque de almacenamiento de biogás.

La función que desempeña el gasómetro es de almacenar gas producido, normalmente la relación entre el reactor y el gasómetro se sitúa entre 3:1 a 10:1, para este caso en particular la relación aplicada será de 5:1, ya que este es un pequeño biodigestor.

El volumen del gasómetro se lo calcula de la siguiente forma:

$$\frac{V_D}{V_G} = 5 \quad (23)$$

Donde:

V_D Volumen del digestor; V_G volumen del gasómetro.

Despejando la ecuación tenemos:

$$V_G = \frac{V_D}{5} \quad (24)$$

Aplicando los valores se determina lo siguiente:

$$V_G = \frac{0.8}{5}$$

$$V_G = 0.16m^3$$

Cálculo de la presión hidrostática en el interior del reactor.

Es necesario conocer el valor de la presión interna que ejerce el sustrato sobre las paredes del digestor, hay que tomar en cuenta que el 70% de la capacidad del reactor contiene la parte líquida y el restante 30% el gas.

En un fluido que se encuentra en reposo, la presión ejercida sobre un punto determinado es la misma en todas las direcciones, esta presión aumenta con la profundidad, debido a que el peso en los niveles más bajos es mayor y en los más altos el peso soportado es menor.

La siguiente ecuación permite determinar la masa líquida del sustrato.

$$m_L = \rho * V_L \quad (25)$$

Donde:

m_L Masa líquida del sustrato; ρ densidad del sustrato; V_L volumen del líquido o sustrato.

Reemplazando los valores tenemos que:

$$m_L = \frac{1000kg}{m^3} * 0.8m^3$$

$$m_L = 800kg$$

Para poder determinar la máxima presión ejercida sobre las paredes del reactor, se aplicará la siguiente ecuación:

$$P = \rho gh + P_0 \quad (26)$$

Donde:

P Presión hidrostática en el fondo; g la aceleración de la gravedad; h altura del fluido; P_0 presión atmosférica en pascales.

Reemplazando los valores tenemos:

$$P = \frac{1000kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * 1.14m + 101\,325 \text{ Pa}$$

$$P = 112508.4 \text{ Pa}$$

$$P = 112.5kPa$$

Una vez determinada la presión ejercida sobre las paredes del reactor se puede seleccionar el tipo de polietileno, sabiendo que 112.5 kPa es el valor de resistencia mínima a la tensión que debe tener el material del reactor.

Sistemas semi – continuos.

Según Torres (2009) “Es el tipo de digester más usado en el medio rural, cuando se trata de digestores pequeños para uso doméstico” (p. 15). Entre los diseños clásicos tenemos el hindú y el chino.

Biodigestor tipo Hindú.

Entre los de tipo hindú existen varios diseños, pero en general son verticales y enterrados. Se cargan por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o retención.

Producen una cantidad diaria más o menos constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación.

El gasómetro está integrado al sistema, en la parte superior del pozo se tiene una campana flotante donde se almacena el gas, balanceada por contrapesos, y de ésta sale el gas para su uso.

En ésta forma la presión del gas sobre la superficie de la mezcla es muy baja, de menos de 20 cm de columna de agua. Por lo general el volumen del gasómetro es del orden de 1/3 del biogás generado al día. (Torres, 2009, pág. 15)

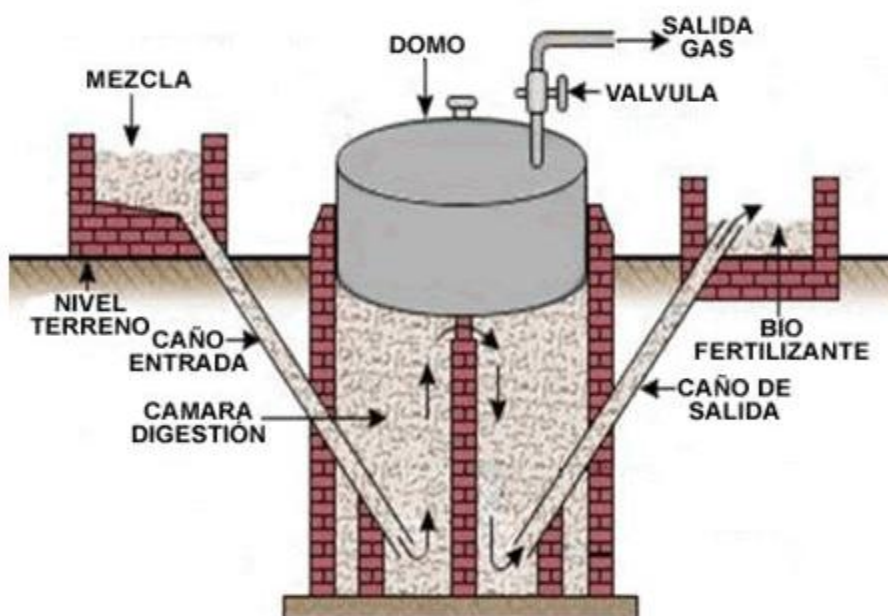


Figura 13. Biodigestor Tipo Hindú por Torres. D, 2009, *Desarrollo de un Sistema de Biodigestores y Energías Limpias*.

Biodigestores tipo Chino.

En lo que respecta a los digestores tipo chino, estos son tanques cilíndricos con el techo y el piso en forma de domo, y se construyen totalmente enterrados.

En este tipo de digestores no existe gasómetro, almacenándose el biogás dentro del mismo sistema. A medida que aumenta el volumen del gas almacenado en el domo de la planta, aumenta su presión, forzando al líquido en los tubos de entrada y salida a subir, y llegándose a alcanzar presiones internas de hasta más de 100 centímetros de columna de agua.

En su texto Torres (2009) sostiene que “a pesar de que el digestor tipo chino es poco eficiente para generar biogás, es excelente en la producción de bioabono, ya que los tiempos de retención son en general extensos” (p. 14).

En la figura 14, se observa el esquema de un digestor chino.

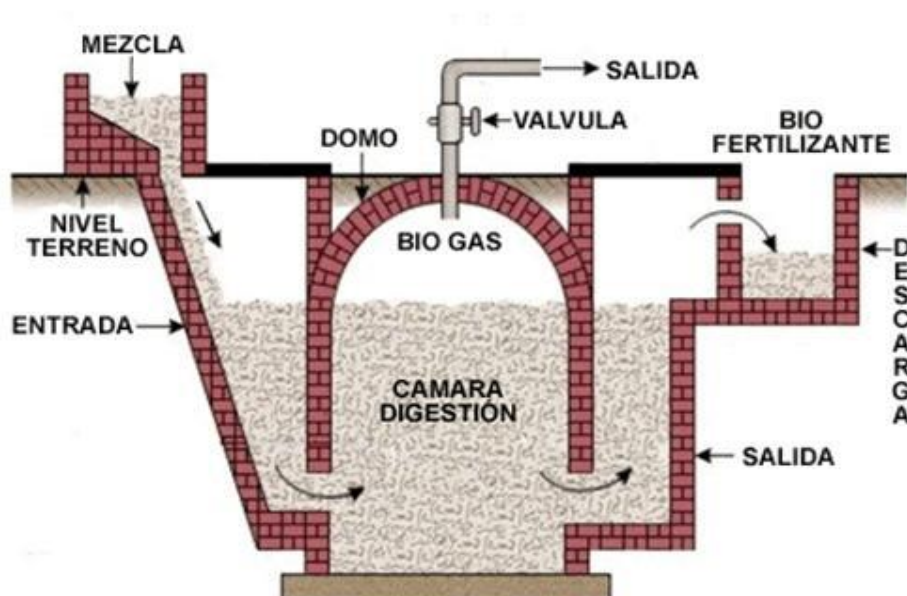


Figura 14. Biodigestor tipo Chino por Torres. D, 2009, *Desarrollo de un Sistema de Biodigestores y Energías Limpias*.

Sistemas continuos.

Este tipo de digestores se desarrollan principalmente para tratamiento de aguas residuales. En general son plantas muy grandes, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionarles calefacción y agitación, así como para su control.

De acuerdo con Torres (2009), “este tipo de plantas de tratamiento son más bien instalaciones industriales, donde se genera una gran cantidad de biogás el cual se aprovecha en aplicaciones industriales” (p. 17).

A continuación en la tabla 15 se muestra un cuadro resumen con las características de los biodigestores más utilizados en las zonas rurales.

Tabla 15
Biodigestores usados en zonas rurales

Características	CHINO	HINDÚ	HORIZONTAL	OLADE - GUATEMALA
Sistema de digestión	Batch y de Mezcla	Desplazamiento vertical	Desplazamiento horizontal	Batch
Características de diseño	Circular, pequeño, Achatado	Cilindro, Vertical, Tanque de gas	Horizontal, Diferentes secciones	Cilindro, Vertical, Tanque de gas flotante
Sustratos	Residuos agrarios, excretas	Estiércol	Estiércol	Residuos agrícolas/estiércol
Tiempo de retención (días)	45 – 90	30 – 60	30 – 60	120

Fuente: Torres, D. Desarrollo de un Sistema de Biodigestores y Energías Limpias. (2009).

1.2.1 Estado actual del conocimiento sobre el tema.

A lo largo de la historia se conocen diferentes documentos e investigaciones sobre el tratamiento de desechos, aguas residuales, generación de energía y utilización de tanques de almacenamiento para la producción de biogás como recurso renovable.

Investigadores reconocidos han presentado estudios sobre ésta temática con el fin de ampliar el conocimiento e impulsar el desarrollo de métodos más eficientes para aprovechar materia de desecho.

En 1884 Louis Pasteur intentó producir biogás a partir de estiércol de caballo recogido de las calles de París. En ese mismo año, junto con su alumno Ulysse Gayon o Gavon obtuvo 100 litros de biogás por metro cúbico de estiércol, al mezclar estiércol y agua a 35° C, sin la presencia de oxígeno. En ese mismo año, otro investigador francés llamado

Pastnier presentó ante la Academia de Ciencias de Francia el primer trabajo sobre la producción de metano a partir de residuos de granjas.

En 1894, en la presentación de los trabajos de Gayon sobre este tema, Pasteur consideró que la fermentación debía ser investigada más a fondo, apuntando que este gas podía ser utilizado para iluminación y calefacción. De hecho Pasteur afirmó que la proporción de producción de biogás obtenida por sus experiencias podía ser suficiente para cubrir los requisitos de energía para la iluminación de las calles de París. Pero la propuesta para mejorar la iluminación callejera de París con la fermentación del estiércol de los caballos, fue tomada a broma por el periódico Le Figaro y no se ejecutaron los trabajos. La aplicación de las fuentes de energía renovable comienza aquí su andadura. (Bautista, 2001, pág. 5)

A raíz de la crisis del petróleo de los años 70 comenzó una oleada de construcciones de digestores, pero su desarrollo se frenó por la escasa producción de metano y el elevado costo de las instalaciones a finales de los 80's.

Esto no quiere decir que la tendencia de producir energía con estos sistemas de biodigestión sufrió un retraso ni quedó estancada, al contrario, el desarrollo de plantas biodigestoras ha tenido un avance tecnológico muy grande, los procesos se han tecnificado y por ende la eficiencia en los procesos ha aumentado dando buenos resultados.

Los países que adoptan el uso de ésta tecnología cada vez son más y demuestra el potencial de grandes plantas como productoras de energía eléctrica.

Aquellos países que emplean esta tecnología son principalmente los países de la región europea.

Bautista (2011) sostiene que “En Alemania se han implementado numerosas plantas para el tratamiento mecánico – biológico de las basuras. La tecnología está basada en procesos anaerobios con algún compostaje aerobio. El proceso anaerobio demostró ser ventajoso ya ha permitido proporcionar bastante energía para la propia planta” (p. 9).

1.2.2 Adopción de una nueva perspectiva teórica.

En el tiempo actual, la investigación sobre mejoramiento ambiental, aprovechando residuos orgánicos para generar energía, ha adquirido gran importancia. Esta no solo es necesaria para la fundamentación y avance del conocimiento, hecho que se justifica por su fomento y mejoramiento de las condiciones de vida y bienestar de la población, modernización y desarrollo. Razones por las cuales nos preocupamos por la contaminación producida en la ciudad con residuos orgánicos.

Una de las metas trazadas es producir biogás mediante el tratamiento y degradación de residuos o desperdicios orgánicos, planteando una solución a la problemática sanitaria y medio ambiental, evidenciando las causas del problema y estructurando un plan que se ajuste a las necesidades y que permita fortalecer el desarrollo y la aplicación de este tipo de tecnologías limpias y amigables con el medio ambiente.

1.2.3 Marco Conceptual.

Proceso Anaeróbico. Es un proceso de degradación de sustancias o materia orgánica en ausencia de oxígeno. Los microorganismos característicos de este proceso emplean las sustancias orgánicas como fuente de alimento, logrando así su degradación. Producto de este proceso se da origen al biogás, que se compone principalmente de dióxido de carbono y metano.

Relación carbono – nitrógeno (C/N). Es un valor numérico que determina la proporción de carbono y nitrógeno; ésta relación caracteriza a los diversos materiales orgánicos biodegradables y nos proporciona una visión más clara para poder combinarlos con el fin de optimizar un compostaje apropiado de los mismos, que se ajuste a los requerimientos necesarios para producir gas.

Microorganismos metanogénicos. Son considerados los más importantes dentro de los microorganismos anaerobios, debido a que éstos son los responsables de la formación de gas metano.

Biogás. Es un gas combustible que tiene su origen en medios naturales, gracias a las reacciones de descomposición de la materia orgánica por medio de microorganismos anaerobios. Es también llamado gas de los pantanos porque en ellos presenta un proceso similar de degradación de residuos vegetales.

1.2.4 Identificación y Caracterización de las Variables.

Variable Dependiente.

En el presente proyecto se estudiarán las variables pertinentes al caso, dentro de las cuales señalaremos que las mismas son de carácter cuantitativo.

La variable dependiente va directamente enfocada a la producción de biogás, siendo este el objetivo del presente trabajo.

Variable Independiente.

Es necesario determinar las variables independientes, las cuales indicarán la dependencia de la variable anteriormente identificada, son factores sin los cuales el objetivo no podrá ser cumplido, ya que variables como la temperatura determinan la rapidez con la cual se produce el gas; la presión, sin la cual no podremos tener un registro del estado de producción; y pH, la cual nos permite obtener una visión acerca del estado químico del sustrato.

CAPÍTULO II

MÉTODO

2.1 Tipo de estudio.

El tipo de estudio empleado para el desarrollo del presente proyecto es descriptivo, ya que además de las consultas bibliográficas que sustentan el estado del mismo se realizarán pruebas estadísticas; basándose en la investigación descriptiva durante el proceso de clasificación y selección de la biomasa, y que permitirán tener una base de datos para su posterior análisis. A continuación se detalla cómo se irán cumpliendo los objetivos para el desarrollo del proyecto de fin de carrera.

Como primer paso se realizará la selección y clasificación de la biomasa para el aprovechamiento de los residuos orgánicos. Como es de conocimiento las materias primas ricas en carbono producen más gas que las ricas en nitrógeno, así mismo es más rápida la producción de gas a partir de materias nitrogenadas, que las ricas en carbono.

También hay que tomar en cuenta que para conseguir un buen rendimiento de gas en forma constante durante la fermentación, es conveniente combinar proporciones adecuadas de biomasa. Posteriormente se determinarán los procesos de digestión para el tratamiento de los residuos orgánicos a utilizar en el biodigestor. Una vez establecida la biomasa a utilizar y el proceso de digestión se realiza el diseño y construcción del biodigestor tomando en cuenta factores como: disponibilidad de equipos y materiales, además de las condiciones de trabajo del mismo.

Finalmente se realizará la alimentación de la biomasa en el biodigestor horizontal, de acuerdo a la clasificación y proporciones establecidas para la obtención del biogás.

2.2 Modalidad de investigación.

La modalidad de investigación que se tomará en consideración para el delineamiento del proyecto es la investigación de campo, ya que los datos serán recogidos directamente del lugar donde se encuentra el objeto de estudio, para lo cual se ha realizado el diseño del reactor que será construido en las instalaciones de la UISEK, ver anexo A.

2.3 Método.

En el método de investigación, se empleará la teoría del muestreo, la cual establece un estudio de las relaciones existentes entre una población y las muestras extraídas de la misma. Para que las conclusiones de la teoría del muestreo e inferencia estadística sean válidas, las muestras deben elegirse de forma que sean representativas de la población.

El proceso por el cual se obtiene de una población, una muestra representativa se conoce como muestreo al azar, de acuerdo con ello cada miembro de la población tiene la misma posibilidad de ser incluido en la muestra.

Esta teoría permite estimar cantidades desconocidas de la población tales como la media poblacional, la varianza, etc., también es útil para determinar si las diferencias que se puedan observar entre dos muestras son debidas a la aleatoriedad de las mismas o, por el contrario son realmente significativas.

Distribuciones muestrales.

Examinar un grupo entero, llamado población, puede resultar muy difícil, al llegar a la idea de examinar solamente una pequeña parte de esta población, llamada muestra.

Considerando todas las posibles muestras que pueden extraerse de una población dada, para cada muestra se puede calcular un estadístico, tal como la media, la desviación típica, etc.,

que variará de una muestra a otra. Así se obtiene una distribución del estadístico que se conoce como distribución muestral.

Muestreo sin reemplazamiento.

El muestreo mediante el cual cada miembro de una población puede seleccionarse una sola vez se llama muestreo sin reemplazamiento.

Una población puede considerarse infinita al extraer muestras de cualquier tamaño sin agotar la población.

Muestras aleatorias.

La confiabilidad de las muestras extraídas pertenecientes a una población dependen de una apropiada selección, de tal forma que represente a la población lo suficientemente bien.

Una manera de hacer esto es asegurarse de que cada miembro de la población tenga igual oportunidad de encontrarse en la muestra, lo cual se conoce como muestra aleatoria.

Estadísticos Muestrales.

Se puede tomar muestras aleatorias de la población y emplearlas para obtener valores que sirven para estimar los parámetros poblacionales.

Teoría de Estimación.

La teoría de estimación permite obtener información sobre una población, mediante muestras extraídas de ella.

La estima de un parámetro poblacional dada por un número de llama estima de punto del parámetro.

La estima de un parámetro poblacional dada por dos números entre los cuales se considera dicho parámetro se llama estima de intervalo del parámetro.

2.4 Población y Muestra.

Las muestras que serán utilizadas para el desarrollo del proyecto serán obtenidas directamente del biorreactor anaeróbico, localizado en las instalaciones de la Universidad

Internacional SEK, su población forma parte del sustrato conformado por el material orgánico de origen animal y vegetal.

Con el fin de conseguir datos estadísticos significativos, se obtendrán alrededor de 15 muestras o lecturas diarias de variables tales como pH, presión y temperatura, las mismas que serán obtenidas con la ayuda del equipo de medición destinado para este fin.

2.5 Selección de instrumentos de Investigación.

En el desarrollo daremos un enfoque experimental al proceso, manipulando las variables de estudio, es decir, controlando el aumento o disminución de dichas variables, observando el comportamiento del fenómeno estudiado bajo condiciones establecidas. Un claro ejemplo sería hacer un cambio en el valor de una variable independiente y observar su efecto en la variable dependiente, con la finalidad de determinar por qué razón o causa se produce un determinado acontecimiento.

2.6 Validez y Confiabilidad de los Instrumentos.

En el proceso de recolección de datos es conveniente confirmar la veracidad de la investigación, mediante la validación del instrumento que proporciona los datos y su confiabilidad que representa el grado de consistencia del instrumento.

Tanto la validez como la fiabilidad de un determinado instrumento se pueden ver afectadas por diversos factores, como por ejemplo, la falta de claridad del instrumento, desconocimiento de las variables que se deben considerar, uso inadecuado del mismo.

Al considerar la variables que formarán parte del desarrollo del proyecto, se ha adquirido el equipamiento adecuado para el monitoreo y medición de dichas variables, el cual consta de medidores de presión, temperatura y pH.

El termómetro utilizado consta de altos estándares de calidad y seguridad, es ideal para su uso en tuberías de proceso, tanques, conductos aire, entre otras aplicaciones. Debido a su ángulo de ajuste, el termómetro puede girar 180°, esto permite tener una cómoda visión.

Este instrumento de medición de temperatura está diseñado para ofrecer una alta precisión y fiabilidad con una caja de aluminio fundido resistente que ofrece una precisión del 1% de la división de la escala, y un rango que se encuentra especificado entre los 0 °F a 160 °F, tal como se muestra en el anexo B.

Los manómetros son elaborados con materiales que garantizan su correcto funcionamiento, son extremadamente sensibles y de alta precisión, este manómetro de baja presión de proceso está diseñado para medir la presión y vacío de medios gaseosos, consta de un tornillo de calibración situado en el dial para volver a poner en cero el indicador, su rango está especificado de 0 a 3 psi y se observa en el anexo C.

El tester de pH es un instrumento ampliamente utilizado en la industria química, agricultura, laboratorios, entre otros, tiene una pantalla de cristal líquido que brinda una lectura precisa del pH en cualquier solución, el electrodo situado en la parte inferior del instrumento está construido con materiales que permiten obtener una medida bastante precisa que garantice una recolección de datos efectiva. Sus datos técnicos se los encuentra en el anexo D.

2.7 Operacionalización de Variables.

Variable: Presión.

Definición conceptual: La presión de gas ejercida en el interior de un recipiente se origina por el choque de sus moléculas con las paredes del recipiente que lo contiene. Cuantas más moléculas choquen mayor será la presión y cuanto más rápido se muevan, mayor será la presión.

Definición operacional: Obtener datos al realizar el monitoreo y medición con la ayuda de manómetros específicamente diseñados para medios gaseosos.

Variable: Temperatura.

Definición conceptual: La temperatura es una magnitud referida a las nociones comunes de caliente o frío que puede ser medida con un termómetro. Existen variedad de propiedades fisicoquímicas de materiales o sustancias que varían en función de temperatura a la que se encuentren.

Definición operacional: Medir la temperatura mediante la utilización de un termómetro industrial con una escala de medición fijada en grados Fahrenheit, en un medio líquido conformado principalmente por materia orgánica.

Variable: pH.

Definición conceptual: El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una solución. La escala de pH generalmente va de 0 a 14 en una solución acuosa, siendo ácidas las soluciones con pH menores a 7 y alcalinas las que tienen pH mayores a 7. El valor de pH = 7 indica la neutralidad de la solución.

Definición operacional: Realizar mediciones de pH, mediante la utilización de un medidor digital, tomando muestras de la solución que se encuentra en el interior del reactor.

2.8 Procesamiento de Datos.

Tabulación de Datos.

Por tabulación se entiende la presentación de datos estadísticos de una investigación de campo en protocolos de tabulación diseñados para tal efecto.

El protocolo de tabulación representa el formato en el cual se concentrarán los datos recopilados en la investigación. Para su funcionalidad, es importante considerar en su diseño todos los elementos que identifiquen al estudio en proceso, así como el espacio necesario para contener los datos obtenidos en el propio trabajo. Para este tipo de tareas es recomendable el uso de tablas o cuadros.

El proceso de tabulación de datos comprende los pasos de codificación y vertido.

La codificación de datos consiste en clasificar los datos de conformidad con los indicadores establecidos en la investigación, cabe destacar que un indicador es toda variable que pueda explicar el fenómeno en estudio.

El vertido o vaciado de datos constituye la operación por la cual se transfieren los datos del instrumento recolector a un protocolo de tabulación.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

3.1 Levantamiento de datos.

Previamente al levantamiento de datos se realizó la construcción del biorreactor de acuerdo a los planos indicados en el anexo A, en los anexos E, F y G se detalla la instalación del reactor, instalación tuberías y equipos de medición, además de los acabados finales de la construcción del biorreactor; en donde se procederá a la obtención de datos de presión, temperatura y pH, los mismos que permitirán dar un seguimiento al proceso de obtención de biogás, para su posterior análisis, estos valores serán registrados con la ayuda de instrumentos destinados específicamente para su medición. De allí es indispensable contar con la información de las condiciones del reactor, tales como su temperatura interna, concentración de hidrógeno y presiones interna tanto del reactor como del gasómetro.

El período de pruebas se realizó durante 51 días, obteniendo un registro diario de 15 muestras por variable, lo cual permitió generar un total de 33 hojas de registro, que corresponde a los días laborales, ya que los fines de semana no se realizó ningún tipo de medición.

El protocolo de tabulación diseñado para la toma de datos de las variables correspondientes se presenta a continuación en la tabla 16.

Tabla 16
Protocolo de Tabulación

Fecha: (____/____/2013).

Hoja No. _____

Tabulación de resultados obtenidos de la lectura de los instrumentos de medición en el reactor.

[illegible]

Fuente: Autor.

3.2 Presentación y análisis de resultados.

3.2.1 Presentación de resultados.

Para realizar el análisis de los datos recopilados se utilizará diagramas de dispersión, los cuales se obtendrán con la ayuda de las tablas obtenidas de cada variable y nos ayudarán a determinar la tendencia de curvas.

Las tablas mostradas a continuación representan los datos que fueron tomados durante el período de 51 días de pruebas al que fue sometido el objeto de estudio y arrojan los siguientes resultados.

Temperatura del reactor.

Los datos presentados en la tabla 17, corresponden a los valores promedios diarios de la temperatura expresada en grados Celsius a la que se encuentra el sustrato en el interior del reactor anaeróbico y se puede observar que la temperatura experimentó un constante cambio en sus valores, siendo más notables aquellos registrados en los últimos días del proceso.

A continuación se muestra la media, los valores máximos y mínimos obtenidos como resultado de la recolección de datos diarios para la elaboración de la tabla global.

Temperatura promedio: 21,89 °C.

Temperatura máxima alcanzada: 28,73 °C.

Temperatura mínima obtenida: 12,92 °C.

Tabla 17

Temperatura en el interior del reactor

Orden	Período de Cultivo (Días)	Temperatura °C
1	2	19,65
2	5	20,55
3	6	12,92
4	7	24,29
5	8	22,74
6	9	20,52
7	12	18,36
8	13	28,73
9	15	25,33
10	16	25,55
11	19	14,59
12	20	14,59
13	21	22,48
14	23	24,55
15	26	24,81
16	27	24,14
17	28	24,63
18	29	20,33
19	30	23,74
20	33	24,03
21	34	17,14
22	35	21,81
23	36	20,85
24	40	15,62
25	41	19,40
26	42	20,89
27	43	21,26
28	44	21,15
29	47	24,26
30	48	23,96
31	49	26,18
32	50	26,92
33	51	26,44
PROMEDIO		21,89
VALOR MAXIMO		28,73
VALOR MINIMO		12,92

Fuente: Marco Arellano J.

Potencial de hidrógeno.

El potencial de hidrógeno es una medida que determina el grado de acidez o alcalinidad que posee una solución, de acuerdo con la tabla obtenida se determina que dentro de los primeros días de proceso este valor tuvo un rango ácido, posteriormente se observa una estabilización del sustrato, esto quiere decir que el valor de potencial de hidrógeno entró en un rango neutro, el cual es el ideal para el proceso.

La tabla 18 indica los valores promedios obtenidos del potencial de hidrógeno expresados en la escala de pH e indican el estado químico al que se encuentra el sustrato en el interior del reactor anaeróbico.

Potencial de Hidrógeno (pH) promedio: 6,40.

Valor de pH máximo alcanzado: 7,26.

Valor de pH mínimo obtenido: 5,39.

Tabla 18

Valores de potencial de hidrógeno

Orden	Período de Cultivo (Días)	pH Escala pH
1	2	5,39
2	5	5,55
3	6	5,68
4	7	5,59
5	8	5,53
6	9	5,47
7	12	5,61
8	13	5,91
9	15	6,15
10	16	6,07
11	19	6,29
12	20	6,4
13	21	6,39
14	23	6,41
15	26	6,65
16	27	6,67
17	28	6,54
18	29	6,71
19	30	6,65
20	33	6,67
21	34	6,65
22	35	6,65
23	36	6,61
24	40	6,92
25	41	6,83
26	42	6,87
27	43	7,26
28	44	7,18
29	47	7,01
30	48	6,73
31	49	6,65
32	50	6,73
33	51	6,73
PROMEDIO		6,40
VALOR MAXIMO		7,26
VALOR MINIMO		5,39

Fuente: Marco Arellano J.

Presión en el gasómetro.

Esta medida de presión indica que la presencia de gas en el gasómetro y su variación depende de otros factores como la temperatura. Los valores representados en la tabla 19, muestran los promedios de presión, el valor máximo y el valor mínimo obtenidos durante el período de pruebas; la recolección diaria de estos valores permite la elaboración global de la tabla de presión en el gasómetro expresado en psi.

Presión promedio: 0.0094 psi

Presión máxima alcanzada: 0.0238 psi.

Presión mínima obtenida: 0 psi.

Tabla 19

Presión en el gasómetro

Orden	Período de Cultivo (Días)	Presión Gasómetro PSI
1	2	0
2	5	0
3	6	0
4	7	0
5	8	0
6	9	0
7	12	0
8	13	0,0238
9	15	0,0238
10	16	0,0238
11	19	0
12	20	0
13	21	0
14	23	0,0238
15	26	0,0238
16	27	0,0238
17	28	0,0238
18	29	0
19	30	0
20	33	0,0238
21	34	0
22	35	0
23	36	0
24	40	0
25	41	0
26	42	0
27	43	0
28	44	0
29	47	0,0238
30	48	0,0238
31	49	0,0238
32	50	0,0238
33	51	0,0238
PROMEDIO		0,0094
VALOR MAXIMO		0,0238
VALOR MINIMO		0

Fuente: Marco Arellano J.

Presión en el reactor.

En la tabla 20, se muestran los valores promedios de presión en el interior del reactor expresados en psi, e indican el nivel de producción de biogás del reactor anaeróbico.

Presión promedio: 0.0094 psi.

Presión máxima alcanzada: 0.0238 psi.

Presión mínima obtenida: 0 psi.

Tabla 20
Presión en el reactor

Orden	Período de Cultivo (Días)	Presión Reactor PSI
1	2	0
2	5	0
3	6	0
4	7	0
5	8	0
6	9	0
7	12	0
8	13	0
9	15	0
10	16	0
11	19	0
12	20	0
13	21	0
14	23	0
15	26	0
16	27	0
17	28	0
18	29	0
19	30	0
20	33	0
21	34	0
22	35	0
23	36	0
24	40	0
25	41	0
26	42	0
27	43	0
28	44	0
29	47	0,0238
30	48	0,0238
31	49	0,0238
32	50	0,0238
33	51	0,0238
PROMEDIO		0,0036
VALOR MAXIMO		0,0238
VALOR MINIMO		0

Fuente: Marco Arellano J.

3.2.2 Análisis de resultados.

Temperatura del reactor.

En la figura 15 se puede observar que la variación de la temperatura interna del reactor anaeróbico posee una tendencia lineal e indica que dentro de la muestra tomada se observa una variación constante de temperatura partiendo aproximadamente en los 19 °C a los 2 días de cultivo de sustrato, posteriormente observamos que se experimenta un decremento a los 6 días de aproximadamente 12 °C siendo este valor el más bajo registrado dentro del proceso; por el contrario a los 13 días existe un aumento bastante significativo de temperatura que se registró en aproximadamente los 28 °C, correspondiente al valor más alto de temperatura alcanzado.

Al llegar a los 20 primeros días del proceso se observa que los cambios en la temperatura fueron más bruscos que en el intervalo de los 40 días en adelante, ya que a partir de este período se contempla un incremento constante que va desde los 15 °C hasta aproximadamente los 27 °C al finalizar el proceso.

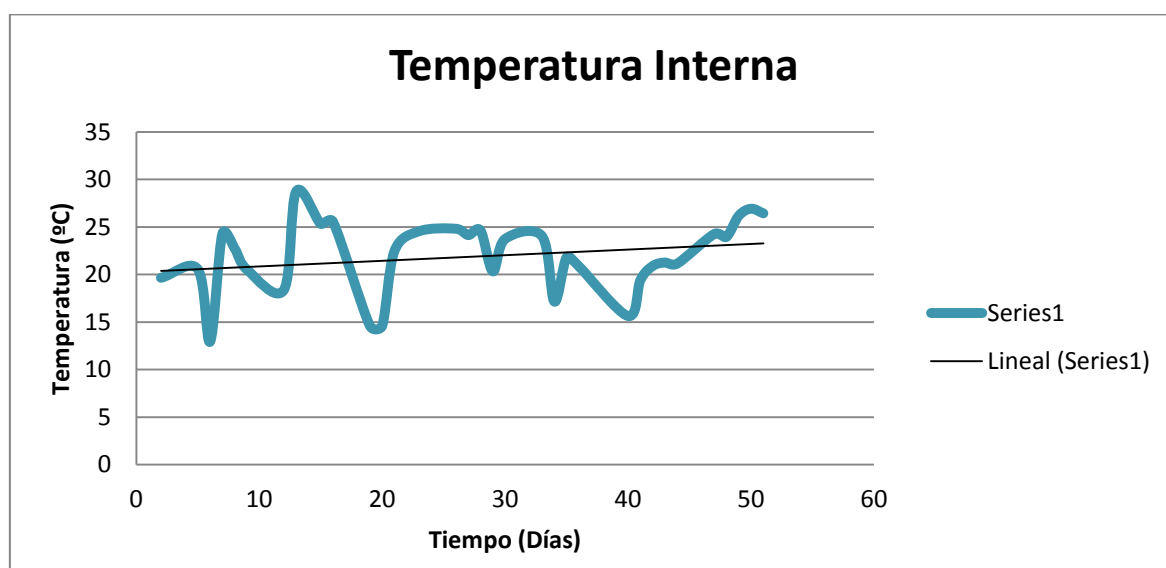


Figura 15. Curva de la temperatura interna por M. Arellano, 2013.

Potencial de Hidrógeno.

En la figura 16 se observa la variación del pH con respecto al tiempo, mismo que indica el estado químico en el cual se encuentra el sustrato en el interior del reactor.

Esta curva muestra que la variación del pH posee una tendencia ascendente a medida que avanza el tiempo; se observa que al iniciar el proceso el valor de la concentración de hidrógeno se ubica en el rango de 5 en la escala de pH, indicando que el estado en ese momento es ácido, es recomendable esperar un determinado tiempo para que el contenido se estabilice, es decir alcance los niveles ideales de trabajo.

Además se aprecia que entre el séptimo y noveno día existe un descenso más significativo de pH llegando aproximadamente a 5,4 en la escala, evidenciando una clara producción de ácido entre los microorganismos; sin embargo, posteriormente se observa un aumento continuo de este valor con el transcurso de los días, constatando la estabilización química del sustrato, haciendo innecesaria la adición de agentes catalizadores para mantener los niveles en el rango debido.

De acuerdo con los datos extraídos a partir de los 26 días el sustrato llega al intervalo recomendado alcanzando un valor aproximado de 6,65 en la escala, logrando un aumento significativo hasta llegar al día 43, momento en el cual se registra el valor máximo correspondiente de 7,26 en la escala, demostrando que en este período el sustrato se encontraba en un rango neutro, llegando a su nivel más adecuado de trabajo. Posteriormente se observa un leve decremento de pH sin llegar a sobrepasar el límite mínimo requerido y manteniéndose estable en los últimos 2 días del proceso.

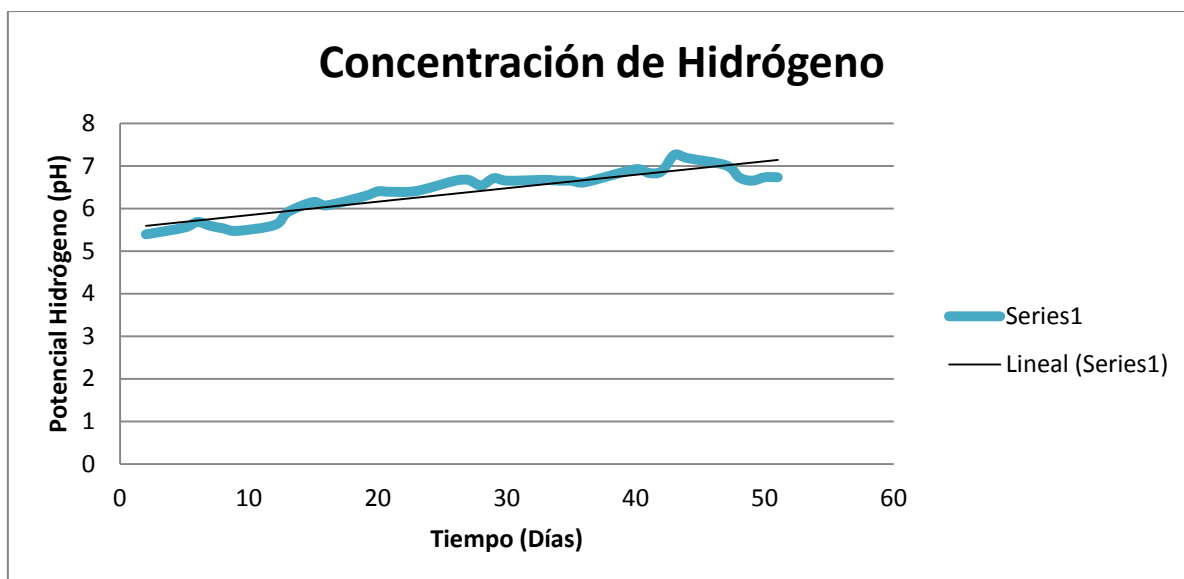


Figura 16. Curva de concentración de hidrógeno por M. Arellano, 2013.

Presión en el gasómetro.

En la figura 17, se observa la variación de presión registrada en el gasómetro durante el período de pruebas.

Se puede apreciar que a los 13 días de retención de sustrato existe el primer indicio de presión dentro del reactor, que son producto de la variación de la temperatura ambiente

A los 23 días, nuevamente se observa un incremento de la presión que se mantiene constante hasta el día 28 y vuelve a caer hasta llegar a 0 psi.

Posteriormente a los 47 días se aprecia un incremento de presión que se mantuvo constante hasta el día 51, donde ya se ha estabilizado el proceso de producción de gas.

Estos constantes cambios de presión en el gasómetro se producen por la variación de la temperatura ambiente, ya que al existir un aumento de ésta, las moléculas de gas presentes en el interior del gasómetro se dilatan provocando una variación en la aguja del manómetro.

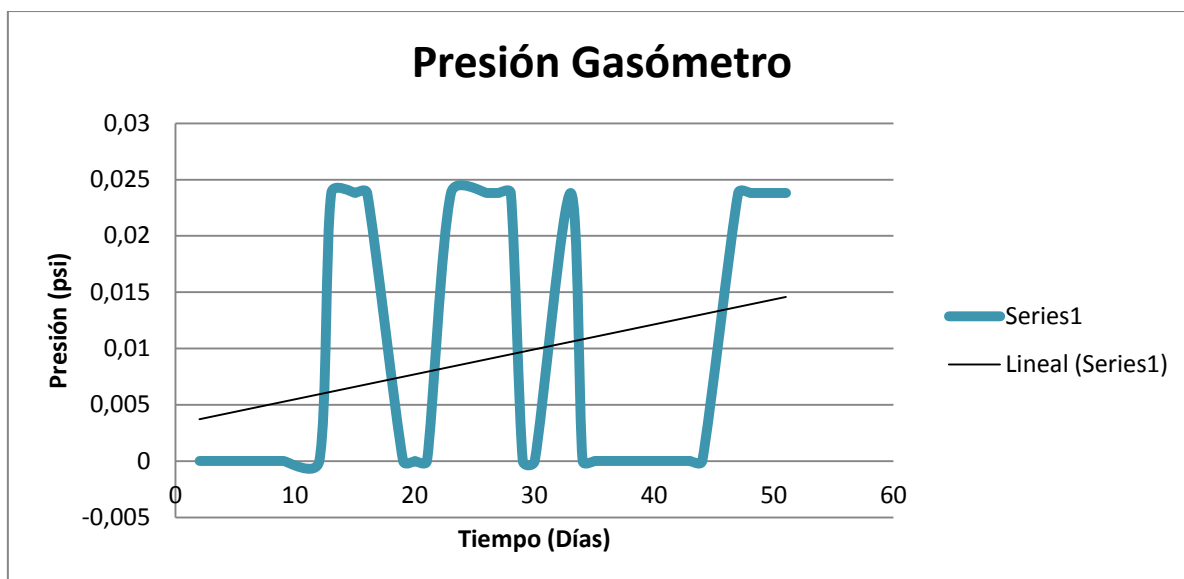


Figura 17. Curva de presión en el gasómetro por M. Arellano, 2013.

Presión en el reactor.

En la figura 18 se muestra el comportamiento de la presión en el reactor anaeróbico, a diferencia de la variación de presión en el gasómetro, la presión en el interior del reactor tiene un comportamiento muy diferente, ya que se puede apreciar que desde el inicio del proceso de pruebas hasta el día 46 se mantuvo estable indicando un valor de 0 psi. En lo posterior se evidenció un aumento constante pero mínimo de presión de 0.0238 indicando el inicio de la producción del gas.

Cabe indicar que la producción de biogás en el rango de temperaturas de 20 a 24 °C se da a partir de los 50 a 60 días aproximadamente.

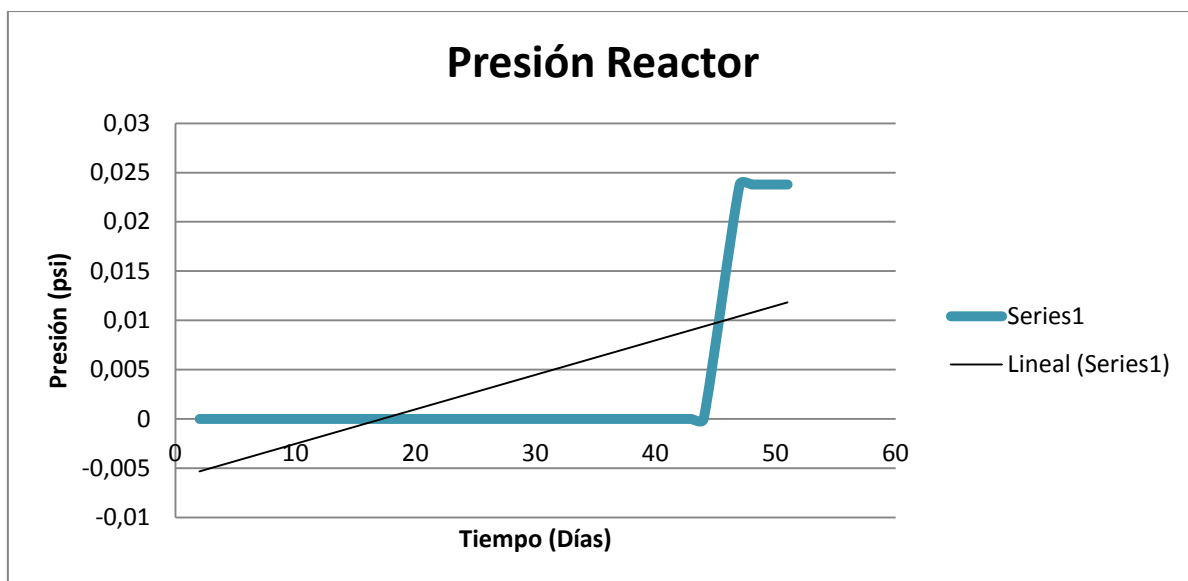


Figura 18. Curva de presión en el reactor por M. Arellano, 2013.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN

4.1 Conclusiones.

- El cambio de la temperatura ambiente, tuvo un efecto importante sobre el sustrato debido a que las bacterias productoras de metano se ven afectadas por su sensibilidad ante la temperatura, una diferencia de aproximadamente 3 °C supondría la muerte de dichas bacterias, reduciendo su población y por ende la generación de gas.
- A partir del día 26 con un valor promedio de temperatura de 24,81 °C, el valor de potencial de hidrógeno experimentó una estabilización, manteniéndose en un rango entre 6,5 y 7,5 en la escala de pH, siendo este estable e ideal para la producción de gas.
- A los 47 días con una temperatura interna del reactor de 24,81 °C y un pH de 7,01 se evidenció el inicio de la producción de gas al observar la estabilización de las presiones tanto del gasómetro y del reactor con un valor de 0,0238 psi.
- El proyecto permite promover investigaciones para el desarrollo de energías renovables, aplicando normas de manejo para el tratamiento de residuos orgánicos y prevenir la afectación ambiental.

4.2 Recomendaciones.

- No realizar un llenado excesivo de material orgánico en el reactor, ya que esto afecta a la producción, reduciendo notablemente la cantidad de gas generado, lo recomendable sería no sobrepasar el 50% de la capacidad total del reactor.
- Utilizar tubería de PVC debido a que el biogás está compuesto por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y ácido sulfhídrico (H_2S); siendo este último altamente corrosivo, afectaría la instalación.
- Aislar el sistema con materiales que ayuden a conservar la temperatura interna en el reactor para que la temperatura ambiente no provoque un efecto negativo en la producción de gas.
- Establecer los balances adecuados entre materia de origen animal y vegetal, con la finalidad de aprovechar al máximo cada una de sus propiedades y alcanzar el mejor rendimiento posible manteniendo la relación carbono – nitrógeno lo más exacto posible.
- Para lograr un manejo mucho más eficiente es viable la instalación de un sistema de calentamiento, para de esta forma proporcionar una temperatura estable que no afecte al proceso de reproducción de microorganismos.
- El proyecto tiene un alto grado de utilidad en localidades agropecuarias, donde existe una gran fuente de residuos de biomasa que pueden ser utilizados para la producción de biogás, brindando de esta forma una adecuada gestión de dichos residuos y aprovechando la energía contenida en ellos.

Bibliografía.

- Vega, J.M., Castillo, F., & Cárdenas, J. (1983). *La Bioconversión de la Energía*. Madrid: Ediciones Pirámide, S.A.
- Madrid, A. (2009). *Energías Renovables: Fundamentos, Tecnologías y Aplicaciones*. Madrid: AMV Ediciones., Mundi – Prensa.
- Ortega, M. (2000). *Energías Renovables*. Madrid, España: Editorial Paraninfo.
- Guevara, A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales: Producción de Gas y Saneamiento de Efluentes*. Lima, Perú: Organización Panamericana de la Salud.
- Anónimo, (2012). *Metano como fuente alternativa energética*.
- Razo, Edison., & Villafuerte, Mílton. (2007). *Diseño, construcción y pruebas de un biodigestor experimental para fines didácticos*. (Tesis de Pre-grado). Recuperada de Repositorio digital de la EPN (Núm. 15000/306).
- Varnero, M. (2011). *Manual del Biogás*, Santiago de Chile: FAO. Recuperado de http://www.rlc.fao.org/fileadmin/content/publicaciones/manual_biogas.pdf
- Romero, J. (2001). *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Pérez, J. (2010). *Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros*. (Tesis de Pre-grado), Universidad de Chile. Recuperado de http://www.cybertesis.uchile.cl/tesis/uchile/2010/cf-perez_jm/pdfAmont/cf-perez_jm.pdf
- Androvetto, E. (2003). *Diseño y operación de un modelo para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la granja porcina de la facultad de medicina veterinaria y zootecnia de la Universidad de San Carlos de Guatemala* (Tesis de maestría), Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, Ciudad de Guatemala.
- Pascual, A., Ruiz, B., Gómez, P., Flotats, X., & Fernández, B. (2011). *Situación y potencial de generación de biogás*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Madrid, España.

- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. (s.f.) *Asesoría técnica en el diseño, elaboración de integración el proyecto mediante el proceso de digestores anaerobios de flujo ascendente para diferentes capacidades*. México: Autor.
- Torres, D., & Arteaga, L. (2009). *Desarrollo de un Sistema de Biodigestores y Energías Limpias*. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
- García, J., Moreno, M., & García, E. (2009). *Energía Verde*. 1ª Edición. Madrid, España: Bellisco Ediciones Técnicas y Científicas.
- CEDECAP, (2007). *Biodigestores de polietileno: Diseño y Construcción*. La Paz, Bolivia.
- Bautista, J. (2011). *Historia del Biogás*. Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario. Murcia, España.
- Sogari, N. (2003). *Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos*. Universidad Nacional del Nordeste. Corrientes, Argentina.

ANEXOS

ANEXO A

PLANOS DEL BIORREACTOR ANAERÓBICO

ANEXO B

HOJA TÉCNICA DE TERMÓMETRO INDUSTRIAL

ANEXO C

HOJA TÉCNICA DE MANÓMETROS DE BAJA PRESIÓN

ANEXO D

HOJA TÉCNICA DE MEDIDOR DE PH

ANEXO E

DETALLE DE LA INSTALACIÓN DEL REACTOR

Anexo E1. Reconocimiento del terreno.



Anexo E2. Instalación del reactor.



Anexo E3. Instalación de componentes.



ANEXO F

DETALLE DE LA INSTALACIÓN DE TUBERÍA Y EQUIPO DE
MEDICIÓN

Anexo F1. Preparación de acoples.



Anexo F2. Ajuste de acoples.



Anexo F3. Instalación de manómetro.



ANEXO G

DETALLE DE ACABADOS FINALES

Anexo G1. Instalación de soporte para cubierta.



Anexo G2. Colocación del techo y césped.

