

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Diseño, construcción y puesta en marcha de un
biodigestor anaerobio prototipo de bajo costo
Propuesta tecnológica**

Andrés Daniel Apolo Yagual

Ingeniería Mecánica

Trabajo de Titulación presentado como requisito para la obtención del título
de Ingeniero Mecánico

Quito, julio 2015

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

**Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio
prototipo de bajo costo**

Andrés Apolo Yagual

Calificación: B

Alfredo Valarezo, Ph.D.

Firma del profesor:

Quito, julio 2015

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: _____

Nombre: Andrés Daniel Apolo Yagual

C. I.: 1715317689

Lugar: Quito, Ecuador Fecha: julio de 2015

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi madre y a toda mi familia. A mis amigos y compañeros.
Profesores y tutores. Gracias por la paciencia y por todo lo compartido.

RESUMEN

El aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera con el subsecuente cambio climático negativo en el planeta, ha llevado a la comunidad mundial a evaluar y mitigar el impacto del hombre sobre el medioambiente. Es por eso la necesidad de implementar tecnologías sencillas y eficaces que nos permitan un desarrollo sustentable y provean un real beneficio para la sociedad humana. Este proyecto pretende desarrollar un sistema de bajo costo de digestión anaerobia, que permita a una pequeña familia rural obtener recursos energéticos y económicos mediante la producción de biogás y biol. La materia prima será el estiércol del ganado disponible recomendando mezclar con desechos orgánicos domésticos o agrícolas para aumentar la producción de biogás y así mitigar el impacto negativo de estos residuos sobre el medio ambiente. El proyecto abarca la comprensión de la digestión anaerobia (procesos, parámetros y productos) junto con el estudio de los diseños existentes de biodigestores. De esta manera se crea el diseño apropiado utilizando materiales de gran resistencia y accesibles en el mercado ecuatoriano, teniendo en base el diseño de digestores taiwanés o tubular de Preston (1987). Se construye, se prueba y se obtienen los parámetros de trabajo para el diseño propuesto. El estudio concluye con la puesta en marcha del sistema, generando el ambiente adecuado para la operación continua del digestor.

ABSTRACT

The increase of the greenhouse gases in the atmosphere with the subsequent negative climate change on the planet, has led the world community to assess and mitigate the human impact on the environment. That is why it is necessary to implement simple and effective technologies for a sustainable development. This project develops a low cost system of anaerobic digestion, allowing a small rural family getting energy and economic resources by producing biogas and bio. The raw material will be livestock manure, domestic and available agricultural organic waste for biogas production, thus mitigating the negative impact of these wastes on the environment. The project involves the understanding of anaerobic digestion (processes, parameters and products) together with the study of existing designs of biodigesters. Thus the appropriate design is created based on Taiwanese or tubular digesters from Preston (1987), using high-strength and accessible materials in the Ecuadorian market. Moreover, the proposed design is built, tested and its operating parameters are obtained. The study concludes with the start up of the system, with a successful production of biogas and bio.

TABLA DE CONTENIDO

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN	2
© DERECHOS DE AUTOR.....	3
AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. Antecedentes.....	14
1.2. Justificación del proyecto	16
1.3. Objetivos	17
1.3.1. Objetivo principal.....	17
1.3.2. Objetivos específicos.....	18
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	19
2.1. Biomasa y producción de biogás.....	19
2.1.1. Definición y origen de la biomasa.....	19
2.1.2. Características de la biomasa para digestión anaerobia.....	20
2.2. Digestión anaerobia	23
2.2.1. Hidrólisis.....	25
2.2.2. Acidogénesis.....	26
2.2.3. Acetogénesis.....	26
2.2.4. Metanogénesis.....	27
2.3. Parámetros importantes en el proceso.....	28
2.3.1. Ausencia de oxígeno.....	28

2.3.2.	Tipo y calidad del sustrato (biomasa).....	29
2.3.3.	Temperatura.....	30
2.3.4.	Tiempo de retención hidráulico (TRH).	31
2.3.5.	pH (acidez y alcalinidad).....	32
2.3.6.	Porcentaje de degradación.....	33
2.3.7.	Inhibidores de la digestión anaerobia.	34
2.4.	Producción de biogás	36
2.5.	Producción de biol	37
2.6.	Biodigestores y su clasificación.....	40
2.6.1.	Digestores de carga en batch o por lotes.	41
2.6.2.	Digestores de mezcla completa.	41
2.6.3.	Digestores de régimen semi-continuo.	42
2.6.4.	Digestores de régimen continuo.	43
2.6.5.	Digestores con retención de biomasa sin recirculación.....	44
2.6.6.	Digestores de dos etapas.....	46
3.	METODOLOGÍA Y DISEÑO DEL PROYECTO	48
3.1.	Selección de tecnología apropiada.....	48
3.2.	Selección de materiales	51
3.3.	Diseño del biodigestor.....	52
3.3.1.	Diagrama de flujo y procedimiento de operación de la planta piloto.....	54
3.3.2.	Plano general, despiece y lista de partes.....	55
3.3.3.	Descripción de equipos.....	58

3.4. Procura, construcción y pruebas	67
3.4.1. Adquisición de materiales.	67
3.4.2. Construcción de la planta.	69
3.4.3. Pruebas de hermeticidad.	73
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS	75
4.1. Diseño y construcción	75
4.2. Puesta en marcha de la planta prototipo	76
4.3. Análisis de resultados	79
4.3.1. Análisis y resultados durante el período de carga (día 1 – día 13).....	79
4.3.2. Análisis y resultados durante la estabilización (día 7 – día 31).	82
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
6. BIBLIOGRAFIA	89
7. ANEXOS	92
7.1. Anexo 1: Emisiones de GEI según sector y número de cabezas de ganado por provincia	92
7.2. Anexo 2: Diagrama de equipos, tubería e instrumentación	94
7.3. Anexo 3: Plano general	96
7.4. Anexo 4: Hoja técnica tanque Biofermentador de Plastigama	98

FIGURAS

Figura 2.1 Clasificación de la Biomasa (Moncayo, 2008)	19
Figura 2.2 Esquema del proceso de digestión anaeróbica (Salamanca, 2009).....	25
Figura 2.3 Esquema digestor batch (Ismail, Adewole, 2014)	41
Figura 2.4 Esquema digestor de mezcla completa (Red Estrategia, 2014)	42
Figura 2.5 Esquema biodigestor hindú (IDAE, 2007).....	43
Figura 2.6 Esquema biodigestor chino (IDAE, 2007).....	43
Figura 2.7 Esquema biodigestor continuo (AgroWaste, 2013)	44
Figura 2.8 Digestores con relleno irregular y lecho fijo (Salamanca, 2009).....	45
Figura 2.9 Digestor con relleno de lecho fluidizado (Salamanca, 2009)	45
Figura 2.10 Digestor con relleno de lecho granular (Salamanca, 2009)	46
Figura 2.11 Digestor de dos etapas (Salamanca, 2009).....	47
Figura 3.1 Esquema básico de un biodigestor tubular y conducción a la cocina (Martí Herrero, 2008)	49
Figura 3.2 Diseño esquemático de digestores tubulares de bajo costo (Martí-Herrero et al., 2014).....	49
Figura 3.3 Instalación en zona tropical con cerca de protección.....	50
Figura 3.4 Biofermentador de Plástigama con instalación de tubería de biogás (AMANCO, 2006).....	53
Figura 3.5 Dibujo Tanque Premezcla y nivel de operación	60
Figura 3.6 Imagen tanque tambor boca ancha 15 gl. (Plásticos Ecuatorianos, 2013).....	60
Figura 3.7 Dibujo Adaptador Tanque de 1"	61
Figura 3.8 Isometría y vista frontal de tubería de alimentación 2"	62
Figura 3.9 Isometría y vista frontal de tubería de salida de 1"	63
Figura 3.10 Isometría y vista frontal de tubería de biogás de 1/2"	64
Figura 3.11 Isometría y vista frontal medición y almacenamiento de biogás	66
Figura 3.12 Termómetro con visor de nivel y frontal de manómetro	67
Figura 3.13 Perforaciones en tanques para las distintas conexiones.	70
Figura 3.14 Sellantes y juntas utilizados en los adaptadores.....	71

Figura 3.15 Ensamble de tuberías con teflón y Gasket Sealant Type 1 para alimentación	71
Figura 3.16 Capa de silicona por debajo y por encima del empaque de la tapa.....	72
Figura 3.17 Fijación de distintas mangueras a acoples con abrazaderas metálicas.....	72
Figura 3.18 Sistema listo para pruebas de hermeticidad del digestor	72
Figura 3.19 Pruebas de hermeticidad con pequeña bomba de aire de baja presión	73
Figura 3.20 Adecuaciones para reparar el seguro de la tapa del digestor	74
Figura 4.1 Planta prototipo de biogás y biol en funcionamiento.....	76
Figura 4.2 Recolección, pesaje y carga de estiércol.....	77
Figura 4.3 Combinación agua-estiércol 1,6 : 1 en tanque de premezcla.....	77
Figura 4.4 Mezcla para eliminación de sólidos y dilución del sustrato.....	78
Figura 4.5 Presión negativa generada en el biodigestor, ayuda a destapar tuberías.....	79
Figura 4.6 Nivel de trabajo del digestor logrado.....	79
Figura 4.7 Gráfico de producción de biogás por día	84
Figura 4.8 Quema de biogás generado	85

TABLAS

Tabla 2.1 Relación C : N desechos comunes (Moncayo, 2008).....	23
Tabla 2.2 Reacciones principales de la digestión anaerobia (Salamanca, 2009).....	28
Tabla 2.3 Producción de gas con distintas biomazas en rangos mesofílicos y psicofílicos (Salamanca, 2009)	31
Tabla 2.4 Tiempo de retención según temperatura (Martí-Herrero, 2008)	32
Tabla 2.5 Degradación de biomazas comunes según temperatura, COV y TRH (Moncayo, 2008).....	34
Tabla 2.6 Concentraciones mínimas para la metanogénesis (Moncayo, 2008).....	35
Tabla 2.7 Características del biogás (Moncayo, 2008).....	36
Tabla 2.8 Producción de biogás según la biomasa (Moncayo, 2008)	37
Tabla 4.1 Comparación entre digestor tubular de bolsa y de tanque vertical propuesto ...	75
Tabla 4.2 Procedimiento de carga de biodigestor hasta el volumen de trabajo.....	77
Tabla 4.3 Temperatura promedio medida en Cumbayá	80
Tabla 4.4 Datos registrados durante el período de carga.....	81
Tabla 4.5 Datos registrados durante el período de estabilización	83

NOMENCLATURA

MAE	Ministerio de Ambiente Ecuador
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
LaDEA	Laboratorio de Energías Alternativas
GEI	Gases de efecto invernadero
ENT	Evaluación de necesidades tecnológicas
USCUSS	Uso de suelo cambio en el uso de suelo y silvicultura
ST	Sólidos totales
oTS	Sólidos volátiles
COV	Carga orgánica volumétrica
TRH	Tiempo de retención hidráulica
$V_{Digestor}$	Volumen digester
$\dot{V}_{carga\ diaria}$	Volumen carga diaria
DQO	Demanda química de oxígeno
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno
pH	Potencial de hidrógeno
AGV	Ácidos grasos volátiles
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de alta densidad
HDPE	High Density Polyethylene
PVC	Policloruro de vinilo
PP	Polipropileno
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
Q_{max}	Caudal máximo
v	Velocidad del fluido
A	Área transversal
P	Presión
ρ	Densidad del agua
g	Aceleración de la gravedad
h	Altura de columna de agua
FS	Factor de seguridad

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, es imperativo incursionar en nuevas soluciones de energía y recursos. Debido a la creciente crisis global, tanto económica como climática, se debe cambiar los recursos y la manera en la que los consumimos. Se debe crear nuevas tecnologías que aporten significativamente al desarrollo sustentable de la humanidad, tecnologías que puedan ser utilizadas incluso en lugares extremos y de escasos recursos. La digestión anaerobia es una de estas tecnologías que, aplicándola correctamente, puede dar un giro en la forma de obtener energía, manejar adecuadamente los desechos orgánicos, y preservar el medioambiente. Esta tecnología se relaciona o se asemeja al proceso de compostaje, pero sobresale por la solución energética que brinda con el biogás y, además, el biol o bioabono producido puede tener mejores propiedades fertilizantes si se opera adecuadamente el digestor.

1.1. Antecedentes

La comunidad científica mundial reconoce la vulnerabilidad que tiene la sociedad actual frente a incluso susceptibles cambios climáticos. Esta repercute no solo en los habitantes sino en todos los ecosistemas del planeta. En Ecuador, por ejemplo, por su ubicación geográfica y topografía, las inundaciones y sequías son las amenazas que más afectan al país, con pérdidas de más de 4 billones de dólares afectando sectores clave como la agricultura y recursos hídricos (ENT/MAE/URC/GEF, 2012).

Política y legalmente, el estado ecuatoriano reconoce este problema y por ende da derechos constitucionales a la naturaleza y promueve el respeto y protección de los ecosistemas. Además promueve la eficiencia energética y el desarrollo y uso de tecnologías limpias y sanas. El objetivo es lograr un ambiente sustentable fomentando la adaptación y mitigación al cambio climático, garantizando así un “buen vivir” para sus

habitantes. Además existen otros agentes como el cambio de la matriz energética que fomenta las energías renovables, el Ministerio de Ambiente (MAE) preocupado en reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), la Secretaría Nacional del Agua entre otros que abogan por la sustentabilidad y el ambiente (ENT/MAE/URC/GEF, 2012).

Internacionalmente, Ecuador se ha comprometido y ha solicitado ayuda a la comunidad internacional con la suscripción al Protocolo de Kioto en 1999. En la actualidad, dispone de la Evaluación de Necesidades Tecnológicas (Proyecto ENT), realizada en asistencia con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, para ayudar a países en vías de desarrollo a obtener recursos para el desarrollo y transferencia de tecnología para el cambio climático (ENT/MAE/URC/GEF, 2012). En esta evaluación se han detectado cinco sectores generadores de GEI: uso del suelo cambio en el uso del suelo y silvicultura (USCUSS), agricultura, procesos industriales, energía (incluye transporte) y desechos. Además, se ha identificado que las GEI generadas por los sectores agrícola y energético pueden ser reducidas utilizando tecnologías como las energías alternativas producto de la biomasa, lo que incrementa el potencial de mitigación en estos sectores (ENT/MAE/URC/GEF, 2012).

El sector que más GEI genera es la agricultura, específicamente la ganadería, por lo que se prioriza la mitigación con proyectos en el manejo de desechos sólidos y líquidos. Se puede ver los datos de emisiones de estos sectores en el Anexo 1. El proyecto prioriza poblaciones frágiles donde han dispuesto de los desechos de manera incorrecta ya sea por su desconocimiento y/o falta de recursos (ENT/MAE/URC/GEF, 2012).

Es aquí donde resultan apropiados los biodigestores, que son sistemas naturales que aprovechan residuos orgánicos procedentes de actividades agropecuarias para producir biogás como combustible y biol como fertilizante, mediante la digestión anaerobia. Esta tecnología viene desarrollándose desde China a mediados del siglo XX con diseños en

ladrillo y mampostería y han evolucionado para ser implementados en países en vías de desarrollo con el diseño Taiwanés o tubular desde los años 80 principalmente (Martí-Herrero et al., 2013). El biogás puede ser utilizado como combustible para cocinar, calentar e incluso generar electricidad. El fertilizante producido no contiene químicos artificiales ni sustancias tóxicas y puede ser utilizado en los propios cultivos del pequeño productor, ser recolectados por centros de acopio o ser dispuesto sin ningún problema sobre la tierra. Así se evita contaminar el agua subterránea y se captura el gas metano que de otro modo terminaría en la atmósfera incidiendo negativamente en el cambio climático 23 veces más que el dióxido de carbono. Los sistemas digestores son fáciles de implementar aunque la complejidad de una planta depende del alcance de la misma. Por estos motivos resulta apropiada esta tecnología: por su bajo costo de inversión, fácil manejo y accesibilidad tanto para pequeños como grandes productores (dependiendo de la cantidad de biomasa a tratar, se puede diseñar digestores más grandes o sistemas en paralelo).

1.2. Justificación del proyecto

Los pequeños productores agropecuarios generan individualmente pequeñas cantidades pero en suma son los que más aportan en GEI. La gran mayoría no ha implementado ninguna tecnología o procedimiento para el manejo adecuado de los desechos (ENT/MAE/URC/GEF, 2012). Es dentro de este sector que se debe implementar y generar tecnologías adecuadas tomando en cuenta las limitaciones económicas de las poblaciones frágiles rurales. Partiendo del modelo Taiwanés o tubular de bolsa plástica, implementado ya en países como Perú y Bolivia en proyectos de necesidades tecnológicas adecuadas para el tratamiento de desechos agropecuarios, se busca desarrollar un sistema similar, de bajo costo y que sea más resistente y duradero que el de bolsa plástica.

La producción de biogás a partir de biomasa residual trae algunas ventajas no solo para el dueño de la instalación, sino también para la sociedad. Las ventajas que traería a comunidades rurales en desarrollo, son principalmente: mejorar la calidad de vida mediante una fuente sustentable y permanente de energía; y económicas ya que el costo de este proceso es relativamente bajo, y se reducen los costos energéticos al disminuir la cantidad de combustibles fósiles o de energía eléctrica que se debe adquirir; además adquiere ganancias con el subproducto generado (biol). En segundo plano, por su característica de energía renovable, presenta numerosas ventajas medioambientales y socioeconómicas. Los digestores cumplen la función ecológica de reciclar totalmente los desechos orgánicos generados por la familia y el ganado. Como resultados protege el suelo (al producir abonos de gran calidad), el agua (al evitar verter residuos orgánicos), el aire y la atmósfera (al reducir las emisiones de metano) reduciéndose así el efecto invernadero. Además, los biodigestores anaerobios anulan la carga contaminante, reducen las fuentes de olores molestos y eliminan, casi en su totalidad, los gérmenes y microorganismos patógenos del vertido.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo principal.

Realizar el diseño, la construcción y puesta en marcha de un biodigestor prototipo de bajo costo para la producción de biogás y biol para aprovechamiento energético y comercial, a partir de los desechos orgánicos comunes producidos por la familia y sus actividades agropecuarias, generando un beneficio real para áreas rurales de bajos recursos.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Revisión bibliográfica sobre el proceso de digestión anaerobia y diferentes diseños de digestores de bajo costo.
- Selección del sistema y materiales.
- Diseño del sistema hidráulico y planos constructivos.
- Adquisición de materiales y construcción del prototipo.
- Pruebas de carga y hermeticidad.
- Comprobación del correcto funcionamiento del sistema mediante puesta en marcha utilizando estiércol bovino.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Biomasa y producción de biogás

2.1.1. Definición y origen de la biomasa.

La biomasa o sustrato se refiere a toda la materia orgánica que proviene de desechos de animales, árboles y planta que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura, del aserradero, y de los residuos urbanos como aguas residuales, basura orgánica y otros (IDAE, 2007). Se podría dividir de la siguiente manera:

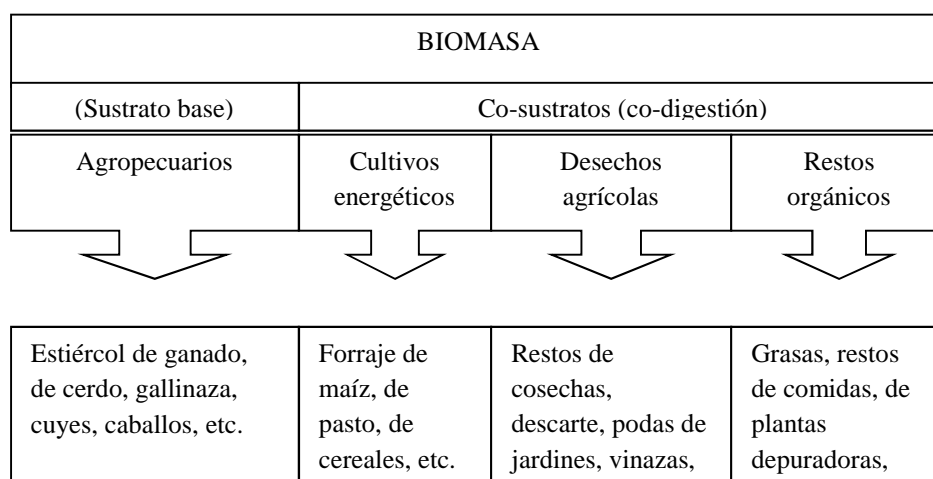


Figura 2.1 Clasificación de la Biomasa (Moncayo, 2008)

No toda la materia orgánica es útil para la digestión anaerobia. Algunos residuos pueden formar metabolitos inhibidores (NH_3 , acumulación de ácidos volátiles) durante la digestión anaeróbica. Además, muchos residuos orgánicos considerados como buena materia prima para la digestión, requieren de un pretratamiento costoso, otros tienen baja biodegradabilidad, conllevan riesgos higiénicos o problemas logísticos de transporte o recolección (Moncayo, 2008).

Por otro lado, también se deben evitar sólidos libres y arena o rocas que puedan obstruir las tuberías. Hay que tomar en cuenta que los residuos orgánicos pueden contener bacterias patogénicas (*Salmonella*, *Listeria*, *Escherichia coli*, coliformes fecales y

enterobacterias) por lo que se deben tomar las medidas de seguridad e higiene pertinentes (IDAE, 2007). Más adelante se explicará que tipos de biomasa son las más óptimas para la digestión anaerobia desde el punto de vista energético, es decir, producción total de biogás.

2.1.2. Características de la biomasa para digestión anaerobia.

Para mejorar el rendimiento de la biomasa en el biodigestor, esta debe cumplir con ciertas características medibles mediante análisis físico-químico en laboratorio.

2.1.2.1. Contenido de sólidos o sólidos totales (ST).

Toda materia orgánica residual que se alimenta al biodigestor, generalmente está compuesta por una importante cantidad de agua y una fracción sólida caracterizada por la concentración de sólidos totales (ST). Se calcula el volumen de agua para diluir la materia prima, hasta la proporción adecuada, según el contenido de sólidos del residuo utilizado y el diseño del biodigestor. En el caso de utilizar estiércol bovino fresco, que contiene entre un 17% al 20% de sólidos totales, se deberá agregar entre 1 a 1,5 litros de agua por cada kilogramo de estiércol fresco, a fin de obtener una mezcla entre el 5% y el 8 % de sólidos totales (Moncayo, 2008).

2.1.2.2. Contenido de sólidos volátiles (oTS).

Es la materia, o fracción de los ST, que se degrada para producir biogás durante la digestión anaeróbica en el biodigestor. Este parámetro representa el contenido real de masa orgánica degradable en la biomasa en porcentaje o en mg/l (ICAITI, 1983). El valor de la concentración de sólidos volátiles es necesario para calcular la carga orgánica volumétrica (COV [kg/m^3]) con la cual se alimenta al digestor (Moncayo, 2008).

2.1.2.3. Carga orgánica volumétrica (COV).

Es la cantidad de materia orgánica seca con la que se alimenta diariamente al biodigestor por cada metro cúbico de volumen de digestor. Se define en kilogramos de sólidos volátiles por metro cúbico de volumen de digestor por día ($\text{kg}_{\text{oTS}} / \text{m}^3_{\text{reactor}} \cdot \text{día}$). El

valor óptimo de la COV depende principalmente de la temperatura del proceso al interior del digestor y del tiempo de retención hidráulica (TRH). Con ella se puede controlar la carga del digestor y es un factor determinante para el dimensionamiento del mismo. Si la alimentación está muy diluida, las bacterias no tendrán suficiente alimento para vivir; mientras si hay muchos sólidos disminuye la movilidad de los microorganismos y del gas y por consiguiente la efectividad del proceso (Moncayo, 2008). Generalmente la COV debe alcanzar valores entre $2 - 3 \text{ kg}_{\text{oTS}} / \text{m}^3_{\text{reactor}} \cdot \text{día}$ (López, 1989). Para COVs mayores a $3 \text{ kg}_{\text{oTS}} / \text{m}^3_{\text{reactor}} \cdot \text{día}$ puede ser que la materia orgánica del efluente del digestor se descargue sin ser degradada completamente (Moncayo, 2008).

2.1.2.4. Demanda química de oxígeno (DQO).

La DQO es la cantidad total de oxígeno (mg/l) necesario para oxidar completamente las sustancias orgánicas en una suspensión bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo y se emplea como medida indirecta de la cantidad de sustrato transformable a biogás (López, 1989).

Por el principio de conservación de la materia, la cantidad eliminada de DQO (que en este caso sería una medida indirecta de la concentración de materia orgánica en el residuo a tratar), se convierte en biogás. Por este principio, la cantidad máxima de metano producible es de 0.35 m^3 de CH_4 / kg. DQO eliminada, en condiciones normales de presión y temperatura (Moncayo, 2008).

2.1.2.5. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).

Este parámetro mide la digestibilidad de los residuos y es el consumo de oxígeno (mg/l de suspensión) durante la degradación por microorganismos durante 5 días a 20 grados centígrados. Tanto la DBO₅ como la DQO son proporcionales al contenido de materia orgánica en la suspensión a degradar, pero la primera es más representativa de la

degradabilidad de la misma. También puede usarse el valor de carbono orgánico total (COT) que se obtiene midiendo el CO_2 formado en la combustión (Moncayo, 2008).

2.1.2.6. Relación carbono – nitrógeno (C : N).

Casi toda la materia orgánica es capaz de producir biogás mediante la fermentación anaeróbica. La cantidad y calidad de este dependerá de la composición del sustrato utilizado. El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimentación de las bacterias formadoras de metano; el carbono (carbohidratos) es la fuente de energía y el nitrógeno (proteínas, nitratos y amoníaco) contribuye a la formación de nuevas células (Carless, 1995).

Los microorganismos dentro del biodigestor utilizan el carbono 30 veces más rápido que el nitrógeno. Si la relación C : N es alta (40 : 1), el nitrógeno será consumido demasiado rápido por las bacterias metanogénicas para formar proteínas y no reaccionará con el material restante, por tanto la producción de gas será lenta (tiende a acidificarse). Por otro lado, si hay demasiado nitrógeno (10 : 1) se produce amoníaco, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso (ICAITI, 1983). Lo ideal es usar una relación de 20 – 30 : 1.

“También se requiere de una cantidad de fósforo en una proporción de N : P = 5 : 1” (Moncayo, 2008). Además deben existir metales alcalinos y alcalinos térreos, como sodio, potasio, calcio y magnesio en pequeñas concentraciones como micronutrientes; para las funciones enzimáticas se requiere también de muy pequeñas concentraciones de hierro, cobre, zinc, níquel y azufre, los que se encuentran en las cantidades necesarias, en todos los residuos orgánicos comunes. La relación ideal de nutrientes es: C : N : P = 75 : 5 : 1 hasta 150 : 5 : 1 (Moncayo, 2008).

Por esta característica muchas veces es necesario la co-generación o mezcla de diferentes tipos de biomasa para optimizar la mezcla C : N y obtener de 20 – 30 : 1. La Tabla 2.1 a continuación muestra las relaciones de algunos desechos comunes.

Relación C : N para varios tipos de desechos			
Agua Residuales	11:1	Paja de Maíz	112:1
Alfalfa	18:1	Paja de Trigo	122:1
Algas Marinas	19:1	Pastos	16:1
Amaranto	11:1	Pulpa de Cacao	16:1
Aserrín de Madera	805:1	Pulpa de Café	16:1
Bagazo de Caña	128:1	Ramas de Yuca	98:1
Basura Orgánica	25:1	Raquis de Banano	61:1
Cáscara de arroz	63:1	Restos de Fruta	35:1
Cáscara de Café	53:1	Restos de Habichuelas	24:1
Cáscara de Soya	33:1	Restos de Lino	90:1
Cáscara de Yuca	96:1	Tallos de Maíz	60:1
Cáscara de fruto de Cacao	38:1	Tomates	12,6:1
Cáscaras de Maní	31:1	Heces de Conejo	23:1
Heno	12:1	Estiércol de Vaca	16,6 – 25:1
Hojas Caídas	50:1	Gallinaza	12:1
Hojas de Banano	19:1	Heces de Ovejas	20:1
Hojas de Eucalipto	15:1	Heces de Cuyes	17:1
Hojas de yuca	12:1	Estiércol de Caballo	25:1
Leguminosas	12:1	Estiércol de Cerdo	15 – 30:1
Madera	700:1	Restos de Pollos	28,6:1
Mazorca de Maíz	49,9:1	Sangre de Cerdo	15 – 30:1
Paja de Arroz	72:1	Sangre de Vaca	15 – 30:1

Tabla 2.1 Relación C : N desechos comunes (Moncayo, 2008)

2.2. Digestión anaerobia

El biogás se genera por la degradación anaeróbica de la biomasa. Este es un proceso natural microbiano que ocurre espontáneamente en la biomasa en ausencia de oxígeno. El resultado es una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como biogás y una suspensión acuosa (biol o bioabono) que contiene los componentes no

degradados o parcialmente degradados y restos inorgánicos que se encontraban inicialmente en la biomasa.

Este proceso es similar al que ocurre en el interior de los estómagos de los rumiantes. Es así que cuando se alimenta con biomasa no adecuada al biodigestor, las bacterias en el interior pueden reaccionar negativamente. El ciclo anaerobio del carbono transforma la biomasa sin oxígeno en compuestos volátiles como el CO_2 , NH_3 , H_2S , N_2 y CH_4 (Moncayo, 2008). Este mismo proceso ocurre en pantanos, en la producción de gas natural y en los yacimientos petrolíferos. En todos estos procesos intervienen las denominadas bacterias metanogénicas (bacterias anaerobias que producen gas metano).

Es un sistema coordinado en la que los diferentes grupos bacterianos utilizan y degradan la materia orgánica para alimentarse y reproducirse, como cualquier ser vivo del planeta. Primero actúan los microorganismos aerobios que descomponen la materia y se consumen el oxígeno existente del sistema. Una vez logrado el ambiente sin oxígeno, se desarrolla la flora anaerobia y sigue consumiendo la materia orgánica. De la respiración de las bacterias se genera los gases arriba mencionados. El siguiente esquema nos describe todo el proceso de la digestión anaerobia.

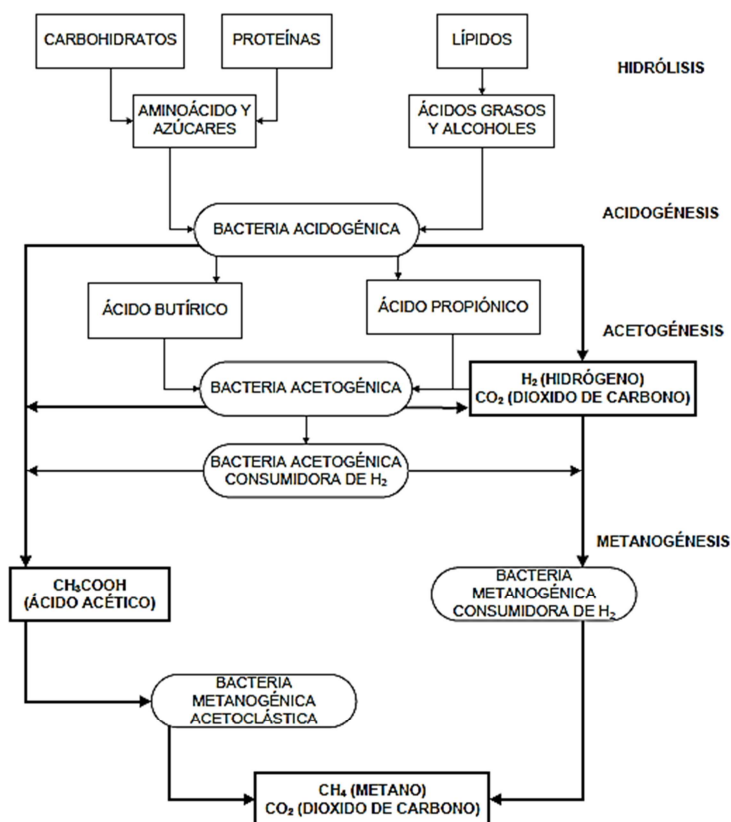


Figura 2.2 Esquema del proceso de digestión anaeróbica (Salamanca, 2009)

La descomposición anaerobia se desarrolla en cuatro etapas que se describen a continuación:

2.2.1. Hidrólisis.

En esta fase se descomponen las cadenas largas de materia orgánica (biopolímeros) en otras más cortas, obteniéndose los productos intermedios. La molécula polarizada del agua y otras bacterias hidrolíticas son las que se encargan de esto y convierten los biopolímeros grasas, proteínas y carbohidratos en polímeros más simples. Los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior celular por lo que se consideran exoenzimas. La hidrólisis es por tanto, la conversión de polímeros en sus respectivos monómeros para que las bacterias puedan asimilar la materia orgánica como alimento (Carrillo, 2004).

2.2.2. Acidogénesis.

En esta fase los productos intermedios resultantes de la hidrólisis, se convierten en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Estas dos primeras fases las realizan un primer grupo de bacterias, las hidrolíticas-acidogénicas y las acetogénicas que hidrolizan las cadenas complejas en ácidos orgánicos simples (acético mayormente). Son dos tipos de bacterias en este primer grupo: las anaerobias facultativas (que se adaptan a la presencia de oxígeno y lo consumen) y las estrictas (que no crecen en presencia de oxígeno). El consumo del oxígeno molecular del aire produce el ambiente anaerobio ideal para el desarrollo de las bacterias estrictas. El crecimiento bacteriano en esta etapa es rápido. En esta primera etapa no hay una reducción significativa de la DQO del sustrato, puesto que las cadenas orgánicas más complejas se transforman en cadenas más cortas, sin consumo o reducción de la materia orgánica presente (Moncayo, 2008).

2.2.3. Acetogénesis.

Esta es efectuada exclusivamente por bacterias acetogénicas que degradan ácidos orgánicos donde los alcoholes, ácidos grasos y compuestos aromáticos se degradan produciendo ácido acético, $\text{CH}_3\text{-COOH}$ y liberando como productos hidrógeno y dióxido de carbono que serán los sustratos de las bacterias metanogénicas. Esta reacción es endoexérgica o que demanda energía para cumplirse y es posible gracias a la estrecha relación simbiótica con las bacterias metanogénicas que substraen los productos finales del medio minimizando la concentración de los mismos en la cercanía de las bacterias acetogénicas. Esta baja concentración de productos finales es la que activa la reacción y actividad de estas bacterias haciendo posible la degradación manteniendo el equilibrio energético (López, 1989).

2.2.4. Metanogénesis.

El último grupo de bacterias convierte los ácidos orgánicos (acético) en metano y dióxido de carbono. Estas son las bacterias metanogénicas estrictamente anaerobias. Las más importantes son las que transforman los ácidos propanoico y acético, denominadas bacterias metanogénicas acetoclásticas. El otro grupo de bacterias metanogénicas, las hidrogenófilas, consumen el hidrógeno generado en la primera parte de la reacción y lo convierten en biogás. Estas últimas bacterias son fundamentales para el equilibrio de las condiciones ambientales de la reacción, puesto que una acumulación de hidrógeno alteraría la biodigestión de la materia orgánica (Moncayo, 2008).

Se deben mantener equilibradas las poblaciones de bacterias acidogénicas y las metanogénicas para una producción adecuada de biogás (Moncayo, 2008). En digester de bajo costo, esto se controla con la adecuada proporción de estiércol o biol en el afluente.

2.2.4.1. Estequiometría de la metanogénesis.

Se balancean las ecuaciones químicas de las relaciones que existen entre los reactivos y productos de cada proceso de la digestión y en última instancia, la relación entre la biomasa y los productos finales (biogás y biol). Durante la síntesis y el crecimiento celular el flujo de electrones es crucial para obtener energía suficiente para todas las funciones celulares. Inicialmente una porción de electrones del sustrato donador es transferida al receptor para la conversión de otra porción de electrones en células microbianas.

De esta manera las reacciones de la digestión anaerobia quedan de la siguiente manera:

Tipo de reacción	Ecuación
Conversión completa de glucosa a CH ₄ y CO ₂	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CH_4 + 3CO_2$
Acidogénesis de Carbohidratos a Ácido Acético	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$
Acetogénesis del Propionato	$CH_3CH_2COO^- + 3H_2O \rightarrow CH_3COO^- + H^+ + HCO_3^- + 3H_2$
Acetogénesis Hidrogenoclástica	$4H_2 + 2CO_2 \rightarrow CH_3COOH + 2H_2O$
Metanogénesis Acetoclástica	$CH_3COOH + H_2O \rightarrow CH_4 + HCO_3^- + H^+$
Metanogénesis Hidrogenoclástica	$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$

Tabla 2.2 Reacciones principales de la digestión anaerobia (Salamanca, 2009)

Debido a las complejas reacciones y procesos efectuados por las distintas poblaciones de bacterias, existen ciertos factores externos que inciden directamente en su actividad metabólica y en la efectividad del proceso.

2.3. Parámetros importantes en el proceso

Entre los factores más importantes que influyen la producción de biogás se tiene a los siguientes:

2.3.1. Ausencia de oxígeno.

Por la naturaleza de las bacterias metanogénicas, que existen en nuestro planeta hace 3 o 4 billones de años, cuando en la atmósfera de la Tierra no había presencia elevada de oxígeno (como la conocemos hoy), éstas solo pueden existir en ambientes anóxicos. La razón por la cual las bacterias metanogénicas no se mueren inmediatamente en presencia de oxígeno es porque viven en conjunto con otras bacterias que se formaron en los procesos previos. Además, el efecto inhibitorio del oxígeno no es permanente, ya que en la flora bacteriana están las bacterias facultativas (adaptativas) que consumirán el oxígeno que pueda existir en el medio (Álvarez, 2004).

Para que ocurra un proceso anaeróbico óptimo deben crearse las condiciones para un medio totalmente libre de oxígeno al interior del digestor. “Mientras el contenido de

oxígeno en el digestor sea menor que el 3 – 5% puede desarrollarse el proceso anaeróbico sin consecuencias negativas” (Álvarez, 2004).

2.3.2. Tipo y calidad del sustrato (biomasa).

La producción de biogás es influenciada por el tipo de biomasa con la que se alimenta al digestor. Esta depende de la cantidad de grasas, proteínas, hidratos de carbono y nutrientes que tenga esta biomasa. El proceso anaeróbico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno sino también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores) (Riofrío, 2010).

Lo más conveniente es equilibrar la mezcla de biomasa para alimentar al digestor (co-digestión). El equilibrio busca la producción de una mayor cantidad de biogás y una biomasa de alto contenido de nutrientes esenciales para el crecimiento de las bacterias. Normalmente los estiércoles contienen estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo, en la digestión de ciertos desechos agroindustriales, puede presentarse el caso de que sea necesaria la adición de otros nutrientes esenciales (Moncayo, 2008).

La calidad de la biomasa debe cumplir ciertas características. Por ejemplo, no se debe cargar con biomasa podrida y/o fermentada ya que por su acidez, puede inhibir el proceso anaeróbico hasta detenerlo (Salamanca, 2009). Tampoco debe cambiarse en forma frecuente o repentina la mezcla con la que se alimenta al digestor. En caso de que sea necesario cambiar el tipo de biomasa, debe realizarse paulatinamente y en un período de varios días para que las bacterias se vayan acostumbrando a la nueva biomasa. Por este motivo se debe controlar el pH de la biomasa de entrada para que sea similar (no tan diferente) al del biodigestor (Riofrío, 2010). Aquí es importante la mezcla C : N : P, optimizada mediante la co-digestión (150 : 5 : 1).

Por todos estos motivos, la biomasa debe ser preseleccionada y pre-tratada antes de ingresar al biodigestor. Todo material extraño como palos, piedras, basuras y plásticos que puedan taponar las tuberías, deben ser removidos. Se debe triturar o trozar cualquier residuo orgánico que viene directamente de la cocina o de la cosecha mezclar y homogenizar con el agua. La dilución de la biomasa debe ser, como ya se mencionó, entre un 5 – 15% (valor de la masa seca el resto debe ser agua) (Riofrío, 2010). Esto además de evitar el taponamiento de tuberías, permite a las bacterias acceder mejor a su alimento y nutrientes (mayor superficie de contacto para las bacterias), mejorando la producción de biogás. De otra manera puede suceder que luego de pasado el tiempo de retención, esta no se haya degradado completamente.

2.3.3. Temperatura.

Existen tres rangos de temperatura en la digestión anaerobia: rango psicrófilico (por debajo de 25° C), mesófilico (entre 25 y 45°C) y otro termófilico (45 – 60° C). La mayoría de digestores funcionan dentro de los límites mesofílicos y la digestión óptima se obtiene a 35°C (Morales, 2005). La tasa de degradación a temperaturas sobre los 45°C es mayor que a temperaturas más bajas, sin embargo las bacterias son sumamente sensibles a los cambios ambientales en especial a las bajas de temperatura.

Esto quiere decir que la producción de biogás aumenta con la temperatura. Temperaturas muy bajas implican tiempos de retención más largos con mayores volúmenes de digestor. En las plantas termofílicas, además de aumentar la producción de biogás, el efluente es más fácil de deshidratar, hay mayor eliminación de patógenos y produce menos malos olores (Moncayo, 2008). Por otro lado, el proceso requiere de altos consumos energéticos para calentarse y mantener la temperatura. Sin embargo, la mayor cantidad de biogás producido puede equilibrar esta demanda.

El rango de trabajo, por lo tanto, de las bacterias es entre los 5 – 70 °C. (Salamanca, 2009). En el caso estudiado en este trabajo, se diseñará un sistema de bajo costo, el cual carecerá de sistema de calentamiento y dependerá únicamente del calentamiento solar y de la energía térmica liberada de las reacciones. Trabajará a temperaturas más bajas que los procesos con calentamiento es decir en el rango denominado psicrófilico (<25°C). A continuación algunos datos de obtención de biogás a partir de distintas biomásas, dependiendo de la temperatura.

Materiales	Mesofílico (35°C)	Ambiente (8 – 25°C)
	m ³ /día	m ³ /día
Estiércol de cerdo	0,42	0,25 – 0,3
Estiércol de vaca	0,3	0,2 – 0,25
Estiércol de humano	0,43	0,25 – 0,3
Paja de arroz	0,4	0,2 – 0,25
Paja de trigo	0,45	0,2 – 0,25
Pasto verde	0,44	0,2 – 0,25

Tabla 2.3 Producción de gas con distintas biomásas en rangos mesofílicos y psicrófilicos (Salamanca, 2009)

2.3.4. Tiempo de retención hidráulico (TRH).

Es el tiempo de permanencia de la biomasa en el digestor. El TRH depende principalmente de la temperatura ambiental y de la carga orgánica (COV) del digestor. Estos dos valores determinan el volumen del digestor. El TRH seleccionado para una biomasa determinada depende de la degradabilidad de la materia orgánica. En este sentido, a mayor degradabilidad menor TRH, y por lo tanto, menor sería el tiempo que tendría que pasar la materia orgánica dentro del reactor. (Salamanca, 2009).

Se calcula para sistemas de carga continua y es el valor del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria:

$$TRH = \frac{V_{Digestor}}{\dot{V}_{carga\ diaria}} \quad \left[\frac{L}{L/día} \right] \quad \text{Ecuación 2.1}$$

El TRH debe ser como mínimo 10 días para que las bacterias puedan desarrollarse. Tampoco debe ser muy alto pues la producción de biogás sería muy baja (Salamanca, 2009). Esto depende del volumen del digestor, o se dimensiona el digestor dependiendo del TRH. Si es muy pequeño el volumen, degradará muy poca biomasa o se descargará sin haberse aprovechado del todo. Se puede corregir esto aumentando la temperatura. La siguiente tabla muestra como influencia la temperatura en el TRH.

Región característica	Temperatura (°C)	Tiempo de retención (días)
Trópico	30	20
Valle	20	30
Altiplano	10	60

Tabla 2.4 Tiempo de retención según temperatura (Martí-Herrero, 2008)

Las reacciones químicas y biológicas de la digestión son más rápidas con energía adicional al sistema que se la consigue en este caso por el calor ambiental. Igualmente esta velocidad de reacción depende de la velocidad de crecimiento de las bacterias que se desarrollan mejor a altas temperaturas. Además a mayor temperatura, mayor solubilidad del sustrato (siendo más accesibles para las bacterias) y mejor separación de las distintas fases (gas-líquido) (Riofrío, 2010).

2.3.5. pH (acidez y alcalinidad).

Además de la temperatura y el tiempo de retención, el pH es uno de los más importantes parámetros de control ya que las bacterias metanogénicas son muy sensibles a variaciones del mismo. Para promover la degradación y concentración de metano, el pH debe estar entre los 6,5 y 7,5 (UPME, 2003).

Los ácidos grasos volátiles (AGV) como el acetato, disminuyen el pH del sustrato. Si las bacterias metanogénicas no alcanzan a convertir rápidamente los AGV como lo hacen las bacterias acetogénicas, éstos se acumulan y disminuyen el pH en el digestor. No obstante, se puede mantener equilibrio con CO_2 – bicarbonato. Normalmente la

concentración de AGV no supera los 2-3 g/l, expresados como ácido acético. Si se sobrepasa este nivel, la digestión cesará en dos o tres días debido a que los metanógenos no pueden utilizar los ácidos a la misma velocidad con que se producen (Riofrío, 2010).

Entre los productos que controlan la alcalinidad y el pH están: cal hidratada (Ca(OH)_2), cal virgen (CaO), carbonato de sodio (Na_2CO_3), bicarbonato de sodio (NaHCO_3), hidróxido de sodio (NaOH), y bicarbonato de amonio (NH_4HCO_3) (Salamanca, 2009).

El pH es muy importante ya que es influenciado por sobrecargas orgánicas y presencia de inhibidores. En función de la alcalinidad del medio, la bajada de pH será más o menos rápida. En residuos ganaderos, que presentan altas alcalinidades, la bajada de pH será poco importante incluso aunque se produzcan importantes acumulaciones de ácidos. (Riofrío, 2010)

2.3.6. Porcentaje de degradación.

Es el porcentaje de la masa orgánica que se degrada durante el tiempo de retención y se transforma en biogás. La degradación total de la biomasa orgánica hasta su mineralización sería solo posible si la biomasa no tuviese lignina, o celulosa, comúnmente encontrada en cortezas y leñas vegetales (madera). En la práctica se requeriría tiempos de retención y volúmenes de digester muy grandes para lograr una degradación casi total de la biomasa. Es por eso que solo se logra degradar del 35 al 75% de la biomasa. La degradación depende del tipo de biomasa o mezcla alimentada al digester. En la tabla siguiente hay algunos valores de degradabilidad según la biomasa, temperatura, COV y TRH.

Tipo de biomasa	Temperatura °C	COV $\text{kg}_{\text{oTS}}/\text{m}^3 \text{días}$	TRH (días)	Tasa de degradación %
Vacuno general	21	2	33	55
Vacuno majada	33	1,1	32	50
Cerdo	14	0,7	30	49
Vacuno y cerdo	30	1,7	25	53
Gallinaza y vacuno	33	1,4	33	48

Tabla 2.5 Degradación de biomásas comunes según temperatura, COV y TRH (Moncayo, 2008)

2.3.7. Inhibidores de la digestión anaerobia.

Al igual que los demás procesos biológicos, la digestión anaerobia es altamente susceptible a concentraciones altas de materiales y sustancias que resultan tóxicas e inhiben la actividad microbiana. Moncayo (2008) enlista algunas a continuación:

- Hidrocarburos, derrames accidentales de algún derivado del petróleo como gasolina, diesel, grasas, aceites para motores, etc.
- Metales pesados, provenientes de las descargas de las industrias de la platería, joyería, curtidoras, etc.
- Sulfuros, provenientes de la metalurgia, minas de carbón, etc.
- Fenoles y resinas plásticas, residuos orgánicos en general, provenientes de la industria química, producción de pinturas, manufactura de muebles y producción de carbón y gas.
- Insecticidas y fungicidas.
- Amoníaco, en este caso el amoníaco se forma dentro del digestor cuando la biomasa está con alto contenido de proteínas.

Hay que recalcar que depende mucho de las concentraciones de estas sustancias ya que en pequeñas cantidades más bien estimulan el proceso. Cuando la sustancia pase la concentración límite, es cuando merma la actividad metabólica de las bacterias. Además, el efecto tóxico de ciertas sustancias puede minimizarse al aumentar la concentración paulatinamente para que los microorganismos desarrollen resistencia (aclimatación: solo quede la población resistente a cierto ambiente tóxico). Otro método es inoculando sepas más resistentes.

El procedimiento para corregir algún problema de toxicidad es el siguiente:

- Si se identifica la presencia del material antes de ingresar al digestor (durante la premezcla o recolección) este debe ser retirado e incluso conocer su origen específico para saber qué tipo de contaminante pueda tener y las concentraciones permisibles.
- Si es difícil de identificarlo y ya ha entrado al digestor, entonces se podrá diluir la concentración añadiendo agua o algún otro fluido.
- La toxicidad de algunos metales pesados como cobre y zinc, puede ser removida añadiendo sulfuros, y si sube la concentración de sulfuros se puede contrarrestar añadiendo metales.

A continuación una tabla con concentraciones límite para algunas sustancias:

Factores ambientales	
pH	6,5-8
Contenido de sales	2,5-25 mS/cm.
Temperatura	8-55 °C
<u>Elemento</u>	<u>Concentración</u>
Oxígeno	<1 ppm
Hidrógeno	6 Pa
Carbono total	0,2-50 g/1 DQO
Magnesio	10-40 ppm
Azufre	50-100 ppm
Hierro	10-200 ppm
Níquel	0,5-30 ppm
Cobalto	0,5-20 ppm
Molibdeno	0,1-0,35 ppm
Zinc	0-3 ppm
Fosfatos	50-150 ppm
Relación C:N:P:S	2000:15:5:3

Tabla 2.6 Concentraciones máximas para la metanogénesis (Moncayo, 2008)

Los productos de la digestión anaerobia son: biogás, biol o bioabono y lodos digeridos.

Además se genera una capa de nata y una de sobrenadante.

2.4. Producción de biogás

El biogás es la mezcla de gas producido por bacterias metanogénicas que transforman material biodegradable anaeróbicamente. Está compuesto de 60 – 80% de metano, 30 – 40% de dióxido de carbono y trazas de otros gases, como nitrógeno, ácido sulfhídrico, monóxido de carbono e hidrógeno como se indica en la tabla a continuación.

Componente	Porcentaje
Metano	60-80
Gas carbónico	30-40
Hidrógeno	5-10%
Nitrógeno	1-2%
Monóxido de Carbono	0-1,5
Oxígeno	0,1
Ácido Sulfhídrico	0-1
Vapor de agua	0,3
Características del Metano	
Densidad	1,09 kg/m ³
Solubilidad en agua	Baja
Presión crítica	673,1 psia
Temperatura crítica	82,5 °C
Poder calorífico	22400 kJ/m ³

Tabla 2.7 Características del biogás (Moncayo, 2008)

La capacidad calorífica del metano a condiciones normales es de 35800 kJ/m³, mientras que el biogás tiene un poder calorífico de aproximadamente 22400 kJ/m³. (Morales, 2005). El volumen se normaliza a condiciones normales con fines comparativos (0°C y 1 atm). Así, como el biogás se producirá a mayor temperatura, el poder calorífico por unidad de volumen será menor.

El contenido de metano depende de la humedad, temperatura y tiempo de retención. Depende mayormente del porcentaje de grasas, proteínas, e hidratos de carbono. Con grasas se obtiene un mayor porcentaje de metano que con hidratos de carbono (Riofrío, 2010).

De manera general la producción oscila 1 – 2 m³ de biogás por cada m³ de digestor o 0,35 m³ de gas metano por kilogramo de DQO degradado (Moncayo, 2008). En la realidad no se puede predecir con exactitud la producción de biogás de determinada biomasa ya que se desconoce la cantidad exacta de componentes y nutrientes que además varían de día en día (Salamanca, 2009). La producción de biogás además dependerá del grado de homogenización de la mezcla por lo que a mayor agitación, mayor producción y el pH debe permanecer entre 6,5 – 7,5. A continuación una tabla con la producción de biogás de algunos tipos de biomasa comunes:

Sustrato	Biogás (m ³ /kg _{OTS})
Orujos agrícolas, cerveceros y de fabricantes de zumo	0,42 - 0,50
Residuos de Matadero y de la transformación de pescado	0,34 - 0,71
Residuos verdes de jardinería y agrícola	0,35 - 0,46
Residuos alimenticios y piensos	0,32 - 0,80
Orujos de la destilación de patata y cereales	0,48
Residuos orgánicos domésticos	0,40 - 0,58
Residuos de separadores de grasa	0,70 - 1,30
Purines agrícolas	0,22 - 0,55
Fango de procesos de depuración	0,45 - 0,75

Tabla 2.8 Producción de biogás según la biomasa (Moncayo, 2008)

2.5. Producción de biol

El residuo orgánico que se descarga del biodigestor resultado de la digestión anaerobia es un lodo-líquido fluido de excelentes propiedades fertilizantes, el cual está constituido por la fracción orgánica que no alcanza a degradarse y por el material orgánico agotado. Durante la fermentación se remueven sólo los gases generados (CH₄, CO₂, H₂S) y se conservan en el efluente todos los nutrientes originales (N, P, K) contenidos en la materia prima, que son esenciales para las plantas. Este aspecto lo convierte en un valioso abono orgánico, prácticamente libre de olores, patógenos y de fácil aplicación (Salamanca, 2009).

La composición del biol, es decir su contenido de nitrógeno, carbono, fósforo, potasio y otros nutrientes, depende del origen del sustrato, de la permanencia en el digestor, de la temperatura del proceso y de la carga orgánica volumétrica. A través de la digestión anaeróbica se degrada la masa volátil de la biomasa en un 25 – 80%, la mayoría en gas metano y en dióxido de carbono (IICA, 2009).

El grado de degradación, en el caso de desechos agropecuarios, depende mayormente del tipo de animal. En el caso del estiércol de ganado vacuno la degradación es de 30% para el estiércol de vacas lecheras y hasta el 40 % para ganado de engorde. Para el caso del estiércol de cerdo la degradación está entre 40 – 50 %. Para la gallinaza este valor está entre el 45 – 65 % (Riofrío, 2010).

El estiércol de ganado contiene cerca de 1% de nitrógeno total. A través del proceso anaeróbico este aumenta a 1,3 % aunque no se forma nuevo nitrógeno por la digestión. Del 15 – 18% del nitrógeno se convierte en amonio (NH_4). El nitrógeno gaseoso se transforma en amoníaco (NH_3), y diluido en agua está a disposición de las plantas como nutriente (Riofrío, 2010).

La composición del bioabono en promedio tiene 8.5% de materia orgánica, 2.6% de nitrógeno, 1.5% de fósforo, 1.0% de potasio y un pH de 7.5 (Kiely, 1997). No posee mal olor, a diferencia del estiércol fresco, tampoco atrae moscas y puede aplicarse directamente al campo en forma líquida. Puede deshidratarse en lechos de secado de lodos y almacenarse para uso posterior. Al deshidratarse puede haber pérdidas por volatilización hasta 60% del nitrógeno total (Riofrío, 2010).

El uso del biol como fertilizante orgánico ha sido probado en varios países y en diferentes cultivos, reportando incrementos en las cosechas y mejoras en las propiedades del suelo a diferencia de los fertilizantes químicos que reducen a largo plazo la productividad de la tierra (Vesiland et al., 1986).

Ventajas del bioabono:

- Control de patógenos: Alrededor del 85% de los patógenos no sobreviven el proceso de biodigestión. “En condiciones de laboratorio, con temperaturas de 35 °C los coliformes fecales fueron reducidos en 50 – 70 % y los hongos en 95% en 24 horas” (Clesceri, Greenberg, 1998).
- Debido a su pH (7,5) funciona como un corrector de acidez, elimina el aluminio tóxico y libera el fósforo de sus sales insolubles de aluminio y hierro. Con elevación del pH se dificulta el desarrollo de hongos patógenos.
- Su poder de fijación es tan grande que evita la solubilidad y lixiviación excesiva de sales, mejora la estructura del suelo, dejándolo más trabajable y facilitando la penetración de raíces. El efluente lleva parte de sus nutrientes en forma no disponible de inmediato para las plantas, los nutrientes se liberan paulatinamente mediante ciertos procesos complejos de descomposición de materia orgánica. De esta forma, la nutrición es lenta pero continua.
- Aumenta el contenido del humus del suelo, el cual mejora la estructura y la textura del terreno, facilita la aireación, la tasa de formación de depósitos de nutrientes, y la capacidad de retención e infiltración del agua.
- Permite el ahorro de la cantidad de otros abonos químicos convencionales sin disminución de la producción.
- Presenta incrementos de la producción, al compararla con la de suelos no abonados.
- Estabiliza la aglomeración de partículas del suelo, logrando que resistan a la acción disgregadora del agua; absorbiendo las lluvias más rápidamente, evitando la erosión y, conservando la humedad por más tiempo. La estructura

porosa permite mayor aireación de la zona de raíces facilitando su respiración y crecimiento.

- Favorece el desarrollo microbiano y las bacterias se multiplican por millones, dando vida y salud al suelo. La intensa actividad bacteriana fija nitrógeno atmosférico, transformándolo en sales aprovechables.

Formas de aplicación del bioabono (Riofrío, 2010):

- Efluente líquido: alta disponibilidad de nutrientes y buena absorción por parte de las plantas, puede aplicarse inmediatamente después de la descarga del digestor, o puede almacenarse en tanques cerrados por un período no mayor a 4 semanas, para evitar grandes pérdidas de nitrógeno.
- Efluente compostado: Se agrega material verde (desechos de forraje de establo) para hacer compost, este método pierde del 30 – 70 % de nitrógeno, pero el producto final es compacto, en forma de tierra negra, lo que facilita el transporte, comercialización y aplicación.
- Efluente seco: El secado pierde casi todo el nitrógeno orgánico. Las producciones observadas en cultivos al utilizar el efluente seco son las mismas que al usar estiércol seco o estiércol almacenado, este procedimiento se recomienda cuando se vayan a fertilizar grandes áreas.

Se lo puede comercializar en forma líquida y sólida. El líquido se lo envasa en botellas plásticas y su precio de venta está alrededor de US\$ 0,50 / lt. El deshidratado está en el orden de US\$ 5 / saco (un saco de 25 kilos al 10 % de humedad) (Riofrío, 2010).

2.6. Biodigestores y su clasificación

Un biodigestor es un recipiente cerrado herméticamente. Permiten la carga de sustratos de biomasa denominados afluente y la descarga de bioabono o biol denominado efluente y

poseen un sistema de recolección y almacenamiento de biogás para su aprovechamiento energético (Martí-Herrero, 2008). Se clasifican según el proceso que siguen, su modo de operación y su capacidad de carga. A continuación una descripción de cada uno:

2.6.1. Digestores de carga en batch o por lotes.

Este tipo de digestores es cargado una sola vez toda su capacidad deseada y se descarga cuando termina la producción de biogás. Es muy utilizado en plantas donde no hay mucho personal operacional o cuando la biomasa está disponible de vez en cuando. Consiste en un tanque hermético con una salida de biogás que es almacenado ya sea en tanques, inflables o gasómetros flotantes. Puede procesar una gran variedad de materia orgánica que puede ser recolectado a campo abierto pero debe evitarse material inerte que pueda entorpecer el funcionamiento (como tierra, piedras y otros). Se puede diseñar una planta de varias unidades de este tipo para lograr una producción continua de biogás. No requiere de atención continua y su producción está en el orden de $0.5 - 1 \text{ m}^3$ de biogás / m^3 de digestor (Solari, 2004).

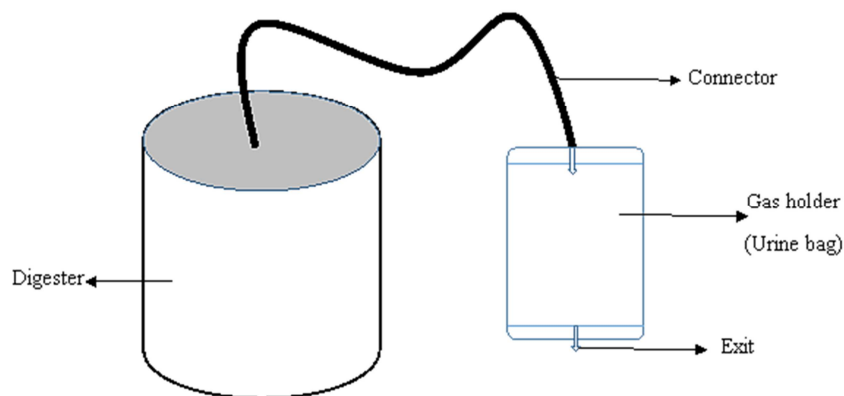


Figura 2.3 Esquema digestor batch (Ismail, Adewole, 2014)

2.6.2. Digestores de mezcla completa.

Este utiliza un sistema de agitación continuo y blando (puede ser mecánico o neumático) para mantener una distribución uniforme de la concentración del sustrato y de las poblaciones de bacterias. Funciona en regímenes continuos y semi-continuos, es decir

con cargas y descargas periódicas. Es utilizado para el tratamiento subproductos semisólidos que gracias a la agitación pueden irse desprendiendo y degradando lentamente (IDAE, 2007).

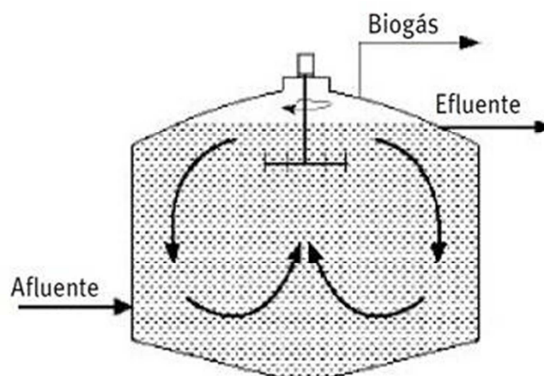


Figura 2.4 Esquema digestor de mezcla completa (Red Estrategia, 2014)

2.6.3. Digestores de régimen semi-continuo.

Son los más utilizados en áreas rurales o pequeños agricultores para uso doméstico. Los más populares son el tipo hindú y chino.

Los de tipo hindú son verticales y van enterrados para poder ser cargados por gravedad una vez por día para producir cantidades constantes de biogás si se mantienen las condiciones de operación. El almacenamiento del gas es la tercera parte superior del volumen del digestor (en forma de campana flotante). Su eficiencia esta alrededor de los $0.5 - 1 \text{ m}^3 / \text{m}^3$ de digestor al día

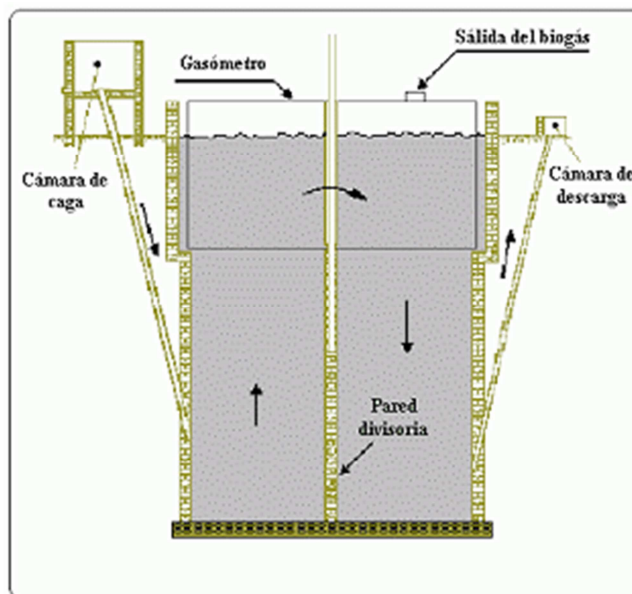


Figura 2.5 Esquema biodigestor hindú (IDAE, 2007)

Los tipo chino son igual enterrados pero con la cúpula fija en forma cilíndrica donde se acumula el gas y se presuriza a medida que se acumula en el domo. Esto fuerza la salida del biol. La eficiencia es baja (entre 0.1 – 0.4 m³ / m³ de digestor) pero en tiempos de retención amplios producen un excelente biol (Salamanca, 2009).

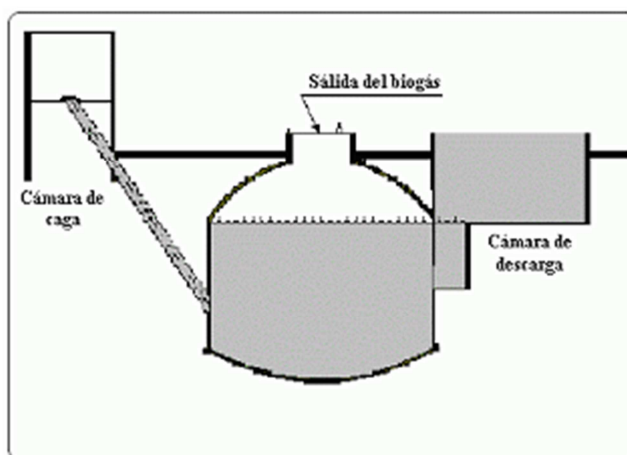


Figura 2.6 Esquema biodigestor chino (IDAE, 2007)

2.6.4. Digestores de régimen continuo.

Son de gran tamaño y utilizados para generación eléctrica. Tienen un alto grado de tecnología, control e instrumentación además de sistemas de agitación y regulación de

temperatura. El proceso de digestión es controlada de forma precisa y se pueden corregir cualquier tipo de anomalías. Son continuos es decir no paran nunca solo para mantenimientos grandes o fallas mecánicas. La desventaja es que por su complejidad debe manejar sustratos prácticamente líquidos que no precipiten y se incrusten. Pero tienen alta eficiencia, TRH cortos y mejor calidad de productos sin importar la mezcla de entrada (pueden mezclarse diferentes tipos de biomasa) (Moncayo, 2008).

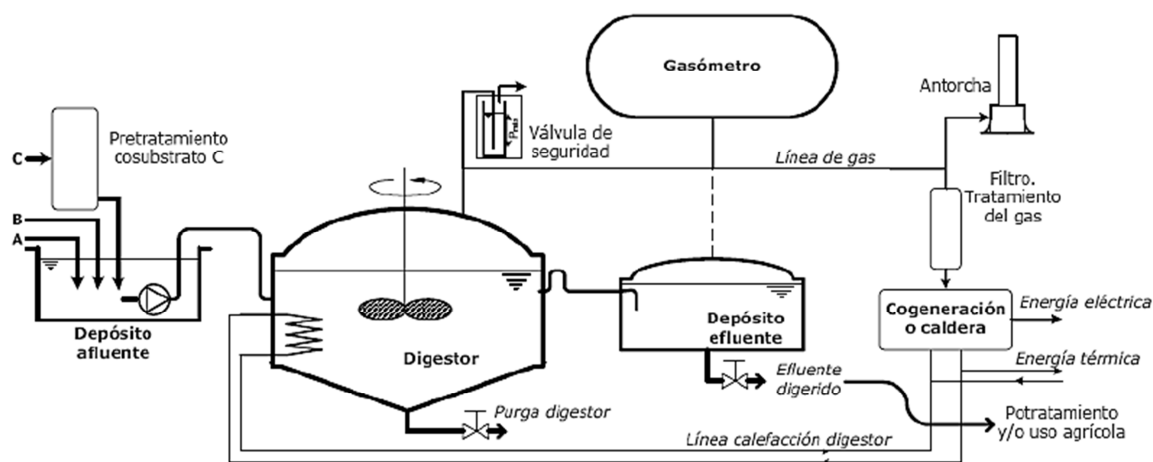


Figura 2.7 Esquema biodigestor continuo (AgroWaste, 2013)

2.6.5. Digestores con retención de biomasa sin recirculación.

Se retienen las bacterias mediante varias técnicas con el fin de un mejor aprovechamiento la biomasa disponible, se acorten los tiempos de retención y se aumente la producción de biogás.

2.6.5.1. Inmovilización sobre un soporte.

Se utiliza un soporte cerámico o de plástico ranurado donde la flora bacteriana es atrapada formando una biopelícula. El flujo de la biomasa es vertical. Hay dos tipos: con relleno irregular y flujo ascendente, donde las bacterias son atrapadas en los intersticios; o de lecho fijo o relleno regular (orientado verticalmente) con flujo descendente. Así, la

eficiencia de las bacterias aumenta para que aprovechen mejor la biomasa (Salamanca, 2009).

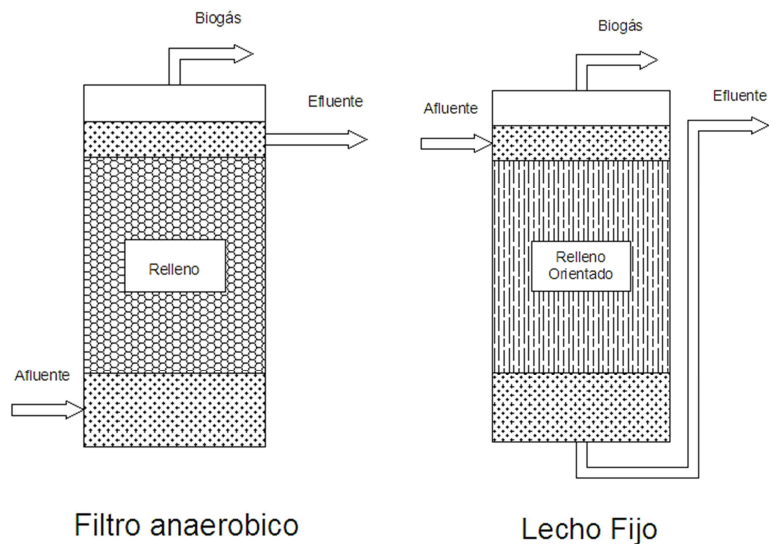


Figura 2.8 Digestores con relleno irregular y lecho fijo (Salamanca, 2009)

Además, también existen los biodigestores de lecho fluidizado donde las bacterias se encuentran adheridas a pequeñas partículas inertes fluidizadas dentro de un adecuado flujo ascendente en el digestor. Para ello se recircula adecuadamente el efluente para lograr la fluidización (Salamanca, 2009).

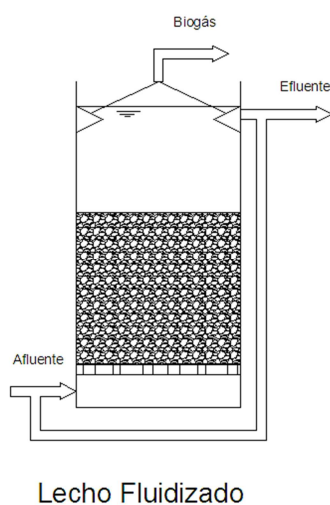


Figura 2.9 Digestor con relleno de lecho fluidizado (Salamanca, 2009)

2.6.5.2. Agregación de biomasa y retención por gravedad.

Se promueve la floculación o agregación de bacterias entre ellas, formando gránulos. Las bacterias se mantienen en el interior del digestor por sedimentación, con la velocidad ascendente adecuada del fluido. En la parte superior debe tener un buen separador sólido, líquido, gas. El diseño más utilizado en el tratamiento de aguas residuales agroindustriales es el *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB). El único limitante para su aplicación es que la biomasa activa granule y no se descomponga en totalidad. Para ello se debe mantener la composición del afluente a tratar y mantener una operación constante establecida la cual sea la más óptima (Salamanca, 2009).

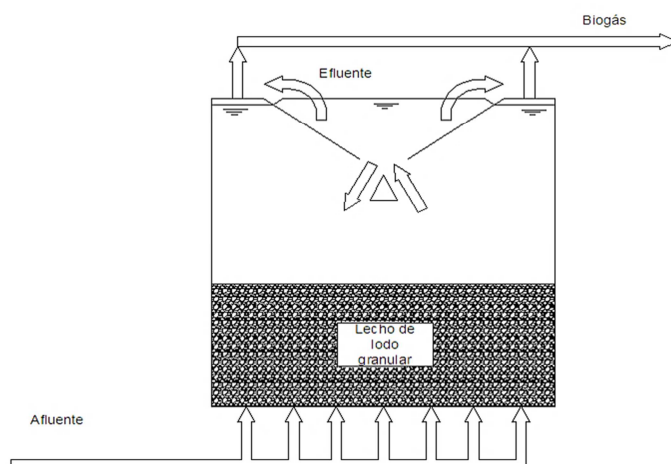


Figura 2.10 Digestor con relleno de lecho granular (Salamanca, 2009)

2.6.6. Digestores de dos etapas.

Como se ha comentado anteriormente, el proceso de digestión anaerobia consta de cuatro etapas que requieren de distintas bacterias y distintas condiciones, ya sea del pH, de las bacterias presentes o los tiempos de retención. Por este motivo, para este tipo de reactores el proceso se divide en dos etapas. En la primera etapa ocurre la hidrólisis y acidogénesis de la materia orgánica compleja, mientras que en la segunda se lleva a cabo la acetogénesis y metanogénesis del material acidificado. En este sistema, se adaptan las

condiciones de cada reactor para que sean las óptimas para cada grupo de bacterias. Por el contrario, este sistema presenta altos tiempos de residencia en la primera etapa (hidrólisis) y bajas eficiencias de conversión. Para el primer reactor (la formación de ácido), se tienen condiciones de pH 5 – 6 y tiempos de retención de sólidos bajos, para favorecer el crecimiento de bacterias acidogénicas y la producción de ácido en el interior del digester. Para la segunda etapa, la formación de metano, se tienen condiciones de pH de 6,5 – 7 para favorecer el crecimiento de bacterias metanogénicas mejorando la producción de biogás con metano.

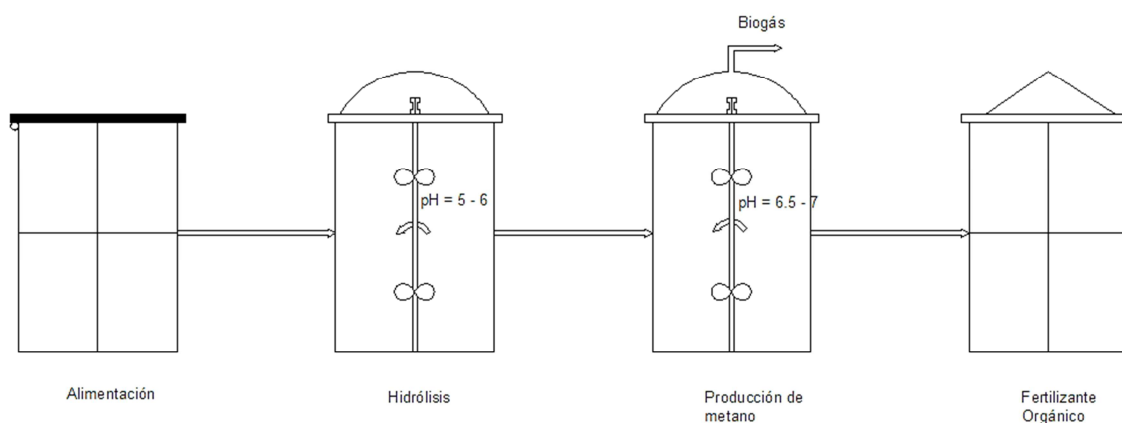


Figura 2.11 Digestor de dos etapas (Salamanca, 2009)

3. METODOLOGÍA Y DISEÑO DEL PROYECTO

3.1. Selección de tecnología apropiada

Luego de estudiado y entendido todo el proceso de digestión anaerobia y el funcionamiento de los biodigestores, es momento de seleccionar y diseñar el sistema que mejor se adapte a las necesidades del proyecto. En este caso se aprovechará el trabajo realizado con los biodigestores tubulares o taiwaneses implementados en Bolivia y Perú por Martí-Herrero. Este modelo de biodigestor ha dado muy buenos resultados en estos países que están más avanzados en sus Proyectos ENT pues ya llevan más de 5 años implementados. Es por eso que son muy útiles para tener un punto de partida y mejorar este diseño para que sean más eficientes.

Este sistema aunque muy simple y económico ha sido un éxito ya que produce energía para poblaciones socio-económicamente frágiles, y el biol llega a “proveer un enfoque de soberanía alimentaria, reduce la expansión de la frontera agrícola, aumenta la productividad agrícola y en suma los ingresos de la familia” (Martí-Herrero et al., 2014).

El sistema está basado en los digestores de domo fijo y tambor flotante (tipo chino o hindú) que son construidos con ladrillos y mampostería muy difundidos en Asia septentrional, India y China (más de 45 millones de unidades). Lo que los hace de bajo costo es la carencia de sistema de calentamiento y mezcla y la complejidad mínima en su operación y mantenimiento. Pero por su robustez y materiales muy costosos e inaccesibles para comunidades rurales dispersas, pobres y parcialmente aisladas, no son muy adecuadas para implementarlas en su diseño original.

Es por esto que utilizan un diseño desarrollado por Preston y otros (1987) de “digestores tubulares de bajo costo”, que funciona con una bolsa flexible de polietileno que

se infla como un globo al cargarse biomasa y producir biogás. El esquema se presenta a continuación.

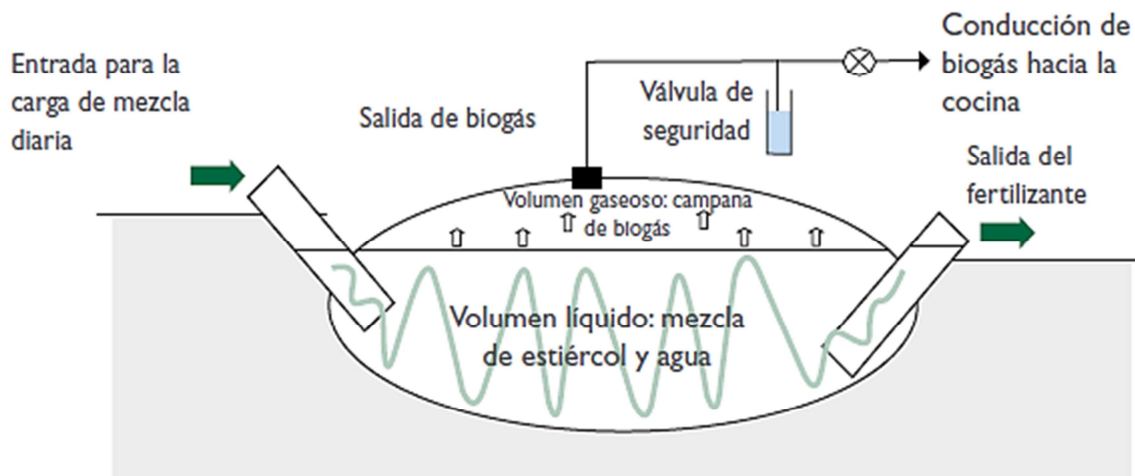


Figura 3.1 Esquema básico de un biodigestor tubular y conducción a la cocina (Martí Herrero, 2008)

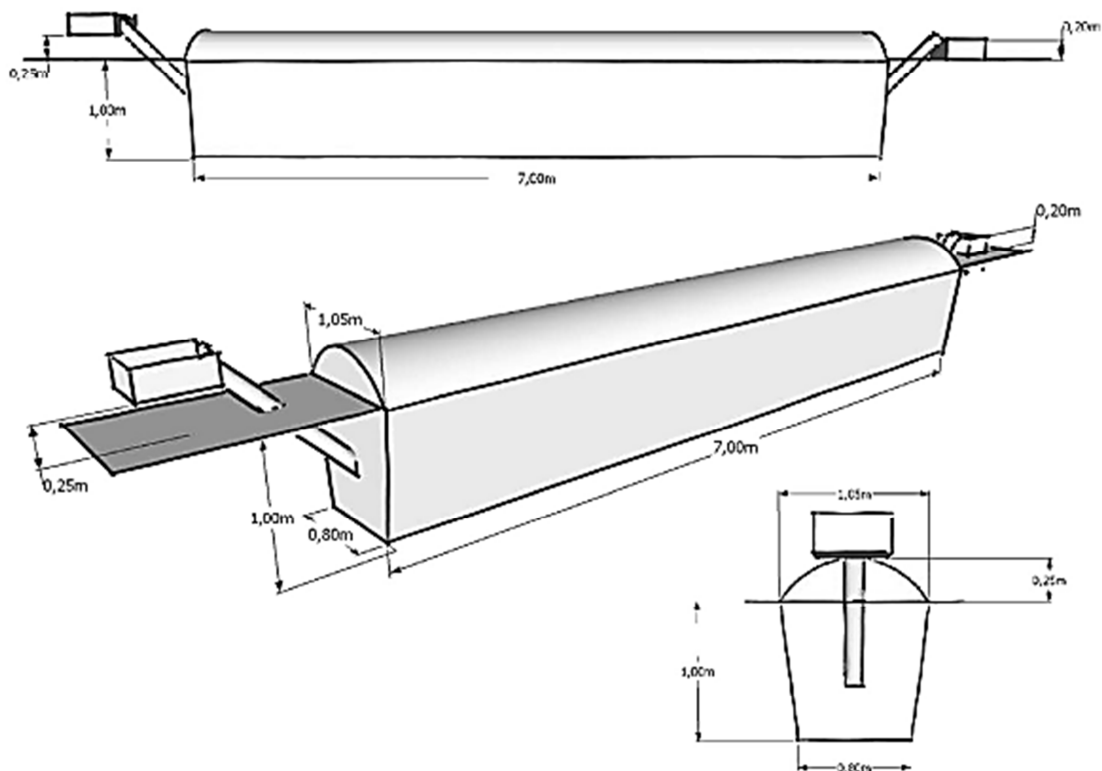


Figura 3.2 Diseño esquemático de digestores tubulares de bajo costo (Martí-Herrero et al., 2014)

El diseño es sencillo y muy fácil de replicar. El costo del mismo oscila entre los US\$ 200 – 250 y puede ser adaptado en casi todos los ecosistemas agrícolas sea altiplano, costa o selva.

El sistema va parcialmente enterrado (la parte líquida está bajo el nivel del suelo) dejando que se infle de gas por sobre el nivel del suelo. De esta manera estabiliza de mejor manera la temperatura del sustrato (con el calor de la tierra). Además este sistema aprovecha el calentamiento del Sol, por lo que debe estar expuesto al mismo el mayor tiempo posible y protegido de agentes externos que puedan dañarla como animales u objetos corto-punzantes que pudieran perforar la bolsa. Es muy útil, en especial en el altiplano, construirle un invernadero para optimizar y estabilizar las temperaturas del sistema.



Figura 3.3 Instalación en zona tropical con cerca de protección

El problema de los digestores tubulares es la fragilidad del sistema debido a la alta probabilidad de rotura de la bolsa de plástico. Estos sistemas tienen una vida media de 5 años, aunque algunos casos aislados han durado hasta 10 años (Martí-Herrero, 2012). Otro

inconveniente es el alto impacto visual ya que ocupan mucho espacio y el diseño es poco estético.

Por todo esto se ha decidido reemplazar la bolsa de rollo de polietileno por un tanque robusto de polietileno de alta densidad (PEAD o HDPE en inglés) con mucha más resistencia (en especial a la corrosión de los gases, el sustrato y la intemperie), con una vida útil de hasta 40 años o más y un menor impacto visual.

De esta manera se pretende buscar el diseño más óptimo utilizando los tanques y materiales existentes en el mercado y accesibles a cualquier familia rural. Se debe priorizar en costos de instalación y mantenimientos bajos, pero con mayor vida útil y mejor resistencia a los diferentes escenarios en los que se desempeñe con un diseño más agradable y funcional. Dependiendo del diseño del tanque, el flujo hidráulico podría cambiar ya que si es vertical y no tipo pistón como los tubulares, la biomasa se mezclará toda y no habrá diferenciación por antigüedad de biomasa.

3.2. Selección de materiales

A partir del diseño seleccionado se realiza una búsqueda exhaustiva de los materiales disponibles en el mercado ecuatoriano. En este caso se revisó los distintos productos en tanques PEAD que hay comercialmente, pues es el mayor condicionante en el diseño. Se elige este material por su excelente durabilidad y resistencia, especialmente diseñados para estar a la intemperie.

Uno de los objetivos es eliminar los trabajos de mampostería que pueden complicar un poco más la instalación y en lo posible solo hacer remoción de tierra para alcanzar los distintos niveles de operación. Lo mejor es aprovechar los desniveles naturales del terreno. Por ejemplo, en vez de cajas de premezcla de biomasa y de salida de fertilizante, se

utilizará también tanques de polietileno instalados a diferentes alturas para aprovechar la gravedad como motor del fluido. Esto para abaratar costos y tiempos de instalación.

Se intenta mantener una homogeneidad en los materiales para que todo pueda ser adquirido con mayor agilidad es decir, donde un solo proveedor y no exista incompatibilidades que luego puedan restar eficiencia en el proceso de digestión, alimentación y descarga de productos (por ejemplo, perder hermeticidad).

En Ecuador existen tres marcas principales de tanques PEAD: Plastigama, Rival y Rotoplas. Plastigama es muy conocida a nivel nacional con una amplia gama de productos muy comercializados y confiables; Rival tiene poca diversidad de productos (no tienen un tanque totalmente hermético, solo para aguas limpias); y Rotoplas es originaria de México, por lo que sus productos pueden tener mayor costo en el mercado ecuatoriano.

Para la tubería y adaptadores de tanque se utilizara de polipropileno (PP) roja, que es igualmente resistente a la corrosión, robusta y menos costosa y más accesible que la de polietileno o PVC de alta presión. Su vida media es de 25 a 50 años, dependiendo de la presión (Mexichem Ecuador, 2014). Además los adaptadores para tanque que más se encuentran en el mercado son los de PP rojo (este es otro de los condicionantes).

Se utiliza una manguera especial de gas para las conducciones fuera del digester hasta la cocina. Para este prototipo adicionalmente se instalarán instrumentación básica de control (manómetro, termómetro y medidor de nivel) igualmente con materiales altamente resistentes y no muy costosos para las subsecuentes pruebas.

3.3. Diseño del biodigestor

Se realiza una búsqueda exhaustiva entre los distintos tanques en el mercado, haciendo un análisis de costo-beneficio de cada uno. Por motivos antes mencionados, entre otros, se escogió la marca Plastigama. En esta marca existen dos tanques que podrían servir para

biodigestor: el Biotanque séptico y el tanque Biofermentador en la línea agrícola. El primero, por su nombre es especializado en tratar aguas servidas domésticas pero con el mismo principio de digestión anaerobia. Sin embargo, los volúmenes de los tanques son muy grandes (de 1200 y 2000 lts.) y por lo tanto es demasiado costoso para nuestro propósito (\$370 y \$580 respectivamente). La otra opción es el Biofermentador que es específicamente para elaborar biofertilizantes.

El Biofermentador tiene una capacidad total de 600 L. Se lo carga una vez cada 120 – 180 días con residuos del cultivo deficitario para hacer fertilizantes orgánicos específicos y se lo abre cada 30 días para mezclar y agregar microorganismos. Es hermético ya que cuenta con una tapa a presión con empaque de caucho y abrazadera metálica que impide el paso de aire. Es específicamente para el proceso que queremos implementar y viene con instrucciones para la instalación de la tubería de biogás (AMANCO, 2006). Su precio oscila alrededor de los \$100 - \$120.



Figura 3.4 Biofermentador de Plastigama con instalación de tubería de biogás
(AMANCO, 2006)

Una vez seleccionado el equipo principal se lo ajusta al diseño de carga continua propuesto. Se sigue el modelo original de dos etapas, de régimen semi-continuo: tanque de premezcla (hidrólisis), biodigestor, almacenamiento de productos y tuberías de conducción

entre las distintas partes. Además se añade instrumentación necesaria para monitorear los parámetros de interés.

3.3.1. Diagrama de flujo y procedimiento de operación de la planta piloto.

Ver Anexo 2 para el diagrama de flujo.

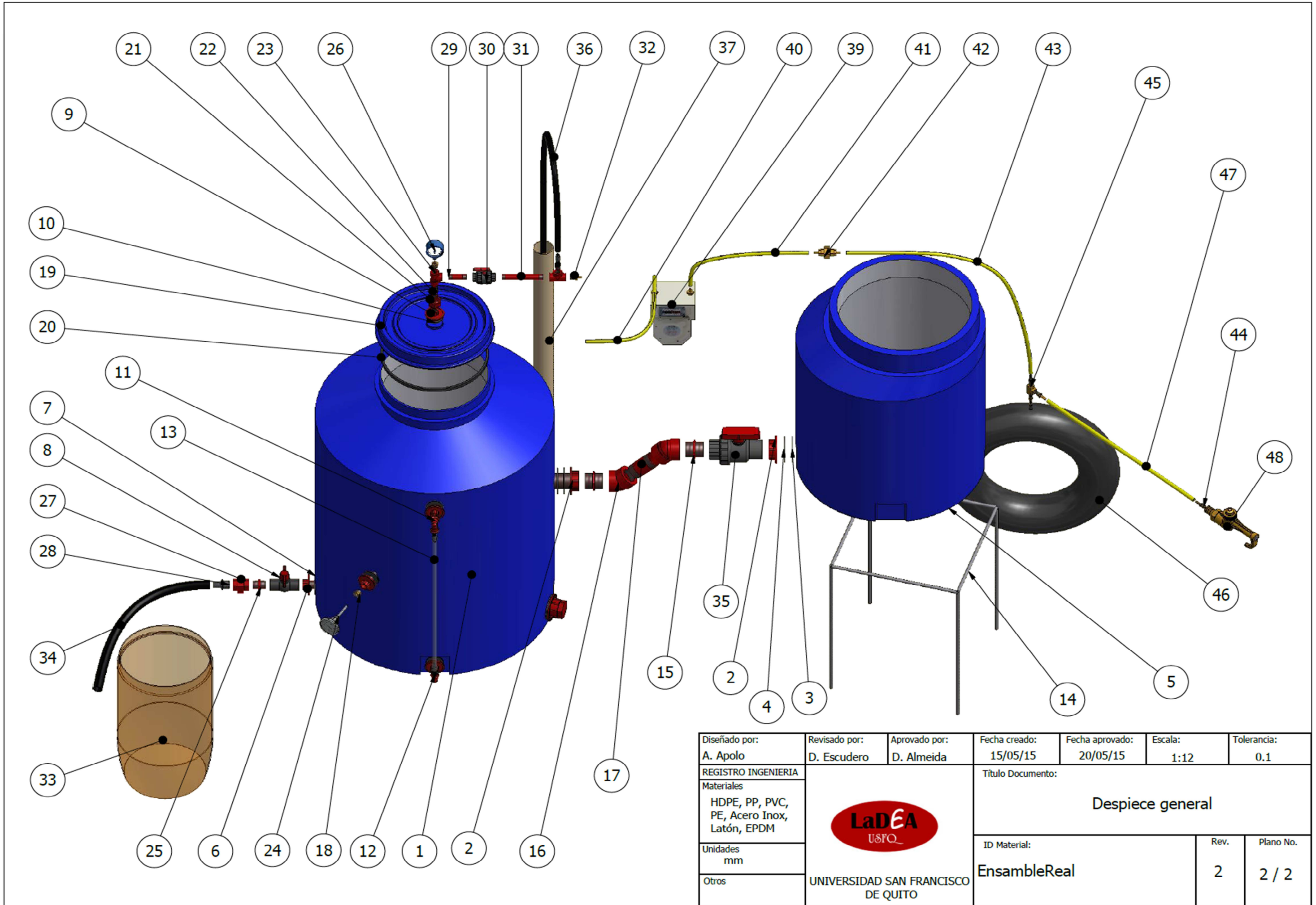
El diagrama muestra la tubería, instrumentación y equipos principales para el diseño de la planta. A continuación se explica brevemente el funcionamiento del sistema.

- Se carga el tanque de pre mezcla TK-001 con agua y desechos orgánicos.
- Se mezcla moderadamente y se deja reposar al menos 24 horas (hidrólisis). Luego se vuelve a mezclar para diluir lo mejor posible el sustrato y que no obstruya las tuberías. Para evitar taponamientos en la alimentación al biodigestor se elige el diámetro de tubería más grande y accesible en el mercado. Para los adaptadores de tanque y tubería de PP lo más grande que hay a un precio accesible es de 2".
- Se abre la válvula de bola HA-101 y se deja pasar la biomasa mezclada al biodigestor. Se cierra la válvula de alimentación para que el biodigestor permanezca cerrado herméticamente.
- Después que se haya efectuado la digestión y se quiera extraer los productos, se debe abrir las válvulas HA-102 (para descarga de biogás) y la HA-105 (descarga de biol).
- Se puede dejar la válvula HA-102 abierta con la PSV-1 setead a 3 psi para que cuando haya sobrepresión en el biodigestor y la tubería de gas, esta se desfogue por esta válvula. La carga del tanque de almacenamiento de biogás será continua y nos sirve de reserva presurizada. La salida a la estufa cuenta con una válvula de bola para mantenimientos o modificaciones. Más adelante se explicará a detalle cada parte.
- Hay que tener en cuenta la instalación de los distintos tanques a diferentes alturas para aprovechar la gravedad para que fluya el sustrato y productos. El de premezcla debe

estar a una altura superior a la entrada al biodigestor y el tanque de biol debe estar por debajo de la salida del digestor.

3.3.2. Plano general, despiece y lista de partes.

Ver Anexo 3 para el plano general.



Diseñado por: A. Apolo	Revisado por: D. Escudero	Aprobado por: D. Almeida	Fecha creado: 15/05/15	Fecha aprobado: 20/05/15	Escala: 1:12	Tolerancia: 0.1
REGISTRO INGENIERIA	 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO		Título Documento: Despiece general			
Materiales HDPE, PP, PVC, PE, Acero Inox, Latón, EPDM			ID Material: EnsambleReal	Rev. 2	Plano No. 2 / 2	
Unidades mm						
Otros						

ITEM	CTDAD	N° DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Biodigestor	600 L HDPE con abrazadera metálica
2	2	Adaptador tanque 2"	Dos bridas PP
3	4	Caucho adaptador 2"	
4	4	Caucho extra 2"	
5	1	Tanque Premezcla	250 L HDPE
6	1	Adaptador tanque 1"	Dos bridas PP
7	2	Caucho adaptador 1"	
8	1	Válvula de bola compacta 1"	PVC
9	4	Adaptador tanque 1/2"	Dos bridas PP
10	8	Caucho adaptador 1/2"	
11	2	Codo HH 90° 1/2"	PP
12	3	Neplo flex 1/2"	rosca manguera PVC
13	1	Tubo visor nivel 1/2"	0,75m manguera transparente vinilo
14	1	Bancada	6m de varilla acero diám. 12mm
15	2	Neplo con tuerca 2"	PP
16	2	Codo HH 45° 2"	PP
17	1	Neplo 10cm 2"	PP
18	2	Reductor macho-hembra 1/2 x 1/4	Latón NPT
19	1	Tapa Biodigestor	HDPE
20	1	Empaque tapa biodigestor	EPDM
21	1	Unión universal 1/2"	PP
22	1	Neplo con tuerca 1/2"	PP
23	2	Tee roscada HHH 1/2"	PP
24	1	Termómetro bimetalico 0 - 100 °C	Acero Inoxidable
25	1	Neplo con tuerca 1"	PP
26	1	Manómetro 0-30psi	Aluminio, latón
27	1	Unión universal 1"	PP
28	1	Neplo flex 1"	rosca-manguera PVC
29	1	Neplo 6cm 1/2"	PP
30	1	Válvula de bola compacta 1/2"	PVC
31	1	Neplo 15cm 1/2"	PP
32	1	Reductor macho macho 1/2" x 1/4"	Rosca-manguera. Latón
33	1	Tanque Biol	60 L HDPE
34	1	Tubo flex 1"	1m. LDPE
35	1	Válvula compacta con universal 2"	PVC. ABS
36	1	Tubo flex 1/2"	2m. LDPE. (Válv. alivio de presión)
37	1	Tubo desagüe 75mm	1,5m. PVC. (Valv. alivio de presión)
38	1	Tapon hembra desagüe 75mm	PVC (Valv. alivio de presión)
39	1	Medidor Gas	Hierro fundido. Préstamo LADEA
40	1	Manguera gas 5/16" (1)	0,7m. Caucho PVC con nylon trenzado
41	1	Manguera gas 5/16" (2)	0,5m. Caucho PVC con nylon trenzado
42	1	Valvula Check gas	Latón. Bronce
43	1	Manguera gas 5/16" (3)	0,9m. Caucho PVC con nylon trenzado

44	4	Terminal 5/16" x 1/8" NPT	rosca manguera macho. Latón
45	1	Tee HHH 1/8"	Latón
46	1	Almacenamiento biogás	Tubo de llanta. Caucho
47	1	Manguera gas 5/16" (4)	0,9m. Caucho PVC con nylon trenzado
48	1	Pistola soplete 1/8"	Aluminio

3.3.3. Descripción de equipos.

3.3.3.1. *Tanque Biofermentador.*

Es un tanque tipo botella de polietileno de alta densidad marca Plastigama, con una capacidad de 600 L. Posee un empaque de caucho (NBR) para juntar la tapa y abrazadera metálica para asegurar la hermeticidad. Se elige este tanque por su disponibilidad y funcionamiento. Es diseñado por Plastigama, con materia prima virgen pura, para elaborar bioinsecticidas, biofungicidas y quelatos.

El polietileno de alta densidad (HDPE por sus siglas en inglés), es un material termoplástico con excelentes propiedades mecánicas como: rigidez, dureza y resistencia a la tracción, impacto y abrasión. También tiene gran resistencia a distintos agentes químicos y térmicos. Resiste también bajas temperaturas (como de altiplano o páramo), es impermeable a líquidos y gases, inerte (al contenido) y no es tóxico. Hay que tener cuidado con agentes oxidantes como ácido nítrico, ácido sulfúrico fumante, peróxidos de hidrógeno o halógenos (Arévalo, 2008).

La capacidad del tanque de 600 L se eligió debido a que es el único tamaño disponible en el mercado ecuatoriano. Sin embargo, su relación costo-volumen es interesante para el desarrollo de un sistema familiar (pequeño productor). Los siguientes tamaños de tanques en otros modelos de HDPE de Plastigama, doblaban su volumen, triplican el precio y tienen otros sistemas de sellado que pueden comprometer la hermeticidad. En el anexo 2 se encuentra la hoja técnica suministrada por el proveedor.

3.3.3.2. *Tanque de pre-mezcla (hidrólisis).*

El tanque de premezcla es similar al biodigestor, un tanque de polietileno de alta densidad tipo botella pero de la línea económica de Plastigama. Tiene una tapa de traba con seguro giratorio que no deja escapar los olores. Su capacidad es de 250 L. Es ideal para el proceso de pre-mezcla ya que, según la periodicidad de carga o el tiempo que se quiera dejar haciendo hidrólisis, se puede cargar bastante biomasa de una sola vez y evitar hacer cargas diarias. Su tapa nos garantiza un ambiente sin olores desagradables o, si es necesario, se podría poner una bolsa plástica entre la boca del tanque y la tapa, para que sirva de junta en la traba. Con este modelo tipo botella, se tiene un diseño más homogéneo (y agradable) en conjunto con el biodigestor. Además, es el más pequeño disponible en esta gama pero su diseño permite facilidad en el momento de alimentar, mezclar la biomasa y diluirla. La boca ancha del tanque y su relación diámetro-altura son ideales para los procesos de alimentación y mezcla.

Debe ir a 650 – 660 mm sobre el nivel del suelo, para que por gravedad, se alimente al biodigestor y de tal manera que al llegar al nivel de operación, se pueda comprobar con el nivel del tanque de premezcla que debe estar justo sobre el orificio del adaptador tanque de 2" (con la válvula abierta para que se igualen los niveles y presión 0 psig en el digestor).

Volumen del sustrato en el digestor = 75% del volumen total del digestor

$$V_{\text{sustrato}} = 0,75 \times 600 \text{ L} = 450 \text{ L} = 0,45 \text{ m}^3$$

$$\text{Área de la base del tanque} = 0,575 \text{ m}^2$$

$$\rightarrow h_{\text{sustrato}} = 0,45 \text{ m}^3 / 0,575 \text{ m}^2 = 0,782 \text{ m} = 782 \text{ mm}$$

Como la altura de trabajo del nivel en el digestor debe ser 780 mm y menos la altura que quedará en el tanque de premezcla de alrededor de 120 mm, se obtiene la altura a la que debe ir instalado el tanque premezcla:

$$780 \text{ mm} - 120 \text{ mm} = 660 \text{ mm} \quad (\text{Altura de instalación})$$

Además con esta altura no se complica la labor de alimentación del tanque.

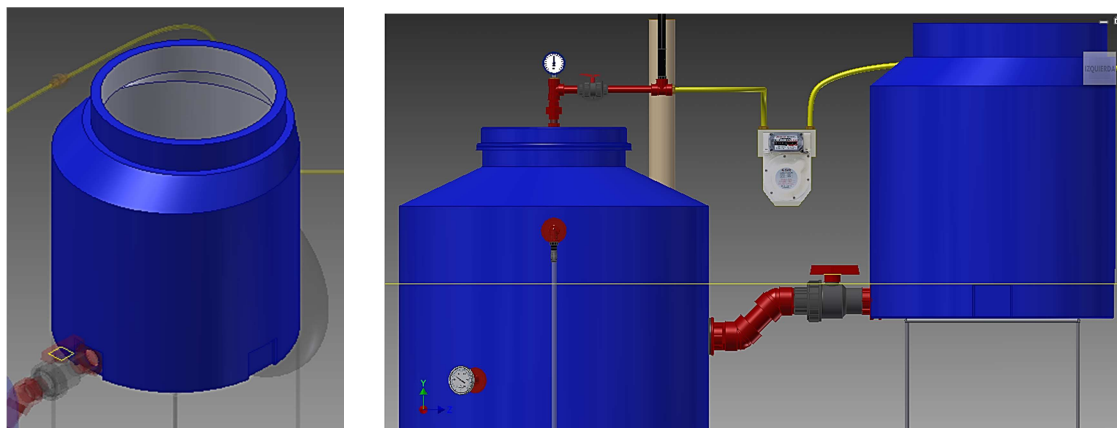


Figura 3.5 Dibujo Tanque Premezcla y nivel de operación

3.3.3.3. *Tanque de salida de biol.*

Para mantener uniformidad en el diseño se utiliza un tanque de HDPE pero en este caso se utiliza un modelo y tamaño más económico y pequeño. Este debe ir por bajo del nivel de la descarga del biodigestor para que fluya por gravedad. El usuario deberá alzarlo para poder retirar el producto o por si quiera reemplazarlo para llenar otro tanque. Es por esto que se utiliza un tanque tipo tambor boca ancha de 60 L fabricado por Plásticos Ecuatorianos S.A.



Figura 3.6 Imagen tanque tambor boca ancha 15 gl. (Plásticos Ecuatorianos, 2013)

3.3.3.4. *Adaptadores herméticos para tanque a tubería.*

Los adaptadores seleccionados son especialmente diseñados para los tanques de PEAD para asegurar su hermeticidad. Su diseño roscable con juntas de caucho, permiten un

sellado perfecto que evita filtraciones de cualquier tipo. Son de polipropileno (PP) que es el más rígido de los termoplásticos. Su deformación es despreciable hasta los 70 °C y es muy resistente con buena dureza superficial. Es apolar por lo que resiste muchos agentes químicos (QuimiNet, 2006). Ideal para el montaje simple requerido. Se utiliza de 2" para la salida del tanque de premezcla y alimentación del biodigestor y se fabrica un par de cauchos más para darle mayor apriete y hermeticidad (poniendo uno en cada lado de la pared, utilizando cuatro cauchos en total para cada adaptador); se utiliza adaptador de 1" para la salida del biodigestor, y de ½" para la salida de biogás e instrumentación (termómetro y nivel).

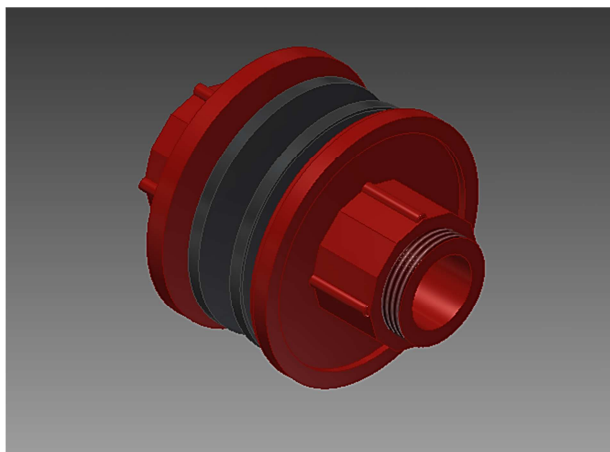


Figura 3.7 Dibujo Adaptador Tanque de 1"

3.3.3.5. *Tubería de alimentación a biodigestor.*

Esta tubería es de 2 pulgadas. Se eligió la de mayor diámetro disponible en el mercado, ya que nuestro fluido puede contener gran cantidad de sólidos que podrían obstruir el flujo. El diseño original de Preston, utiliza tubería hidrosanitaria de 4", desgraciadamente en el mercado ecuatoriano la tubería y accesorios de mayor diámetro existente es la de 2" en PP. Si se desea de un diámetro más se debe mandar a fabricar bajo pedido especial, lo cual incrementaría significativamente el costo total. Por ejemplo, solo mandar hacer un adaptador tanque de 3" en plástico cuesta alrededor de US\$ 70. Este

condicionante nos obliga a utilizar los adaptadores de 2" y para mantener uniformidad se utiliza el mismo material y diámetro para toda la alimentación.

La válvula de control de flujo es una válvula de bola de una sola universal de 2" de Plastigama. Es de PVC y ABS con rosca NPT y sellos de teflón garantizando la hermeticidad y resistencia a la corrosión (AMANCO, 2008). Se elige con una sola universal para futuros mantenimientos y desensambles. Un reemplazo para esta válvula sería la válvula compacta sin universal y adicional la universal de 2" de PP.

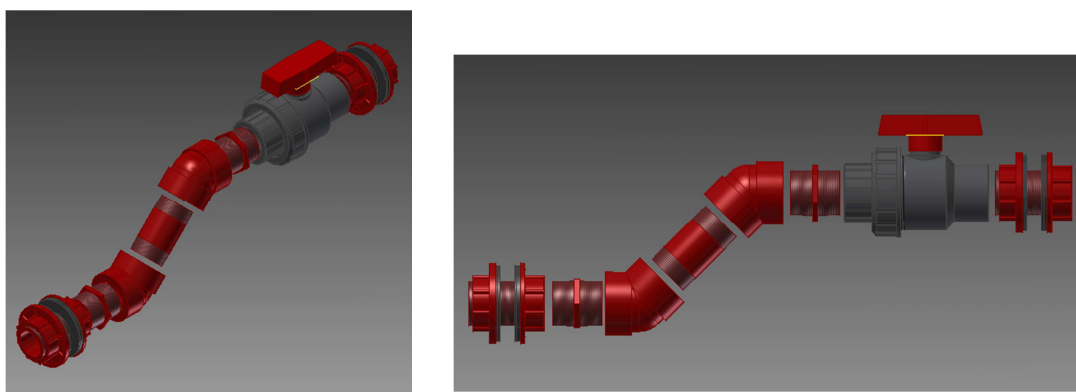


Figura 3.8 Isometría y vista frontal de tubería de alimentación 2"

Tiene esa forma para garantizar un sellado hidráulico en el desnivel de los tanques, además la caída por gravedad ayuda a que fluya el sustrato. Según norma, la velocidad de flujo en tuberías debe ser alrededor de 1,5 m/s (CENEC, 2011). Con el diámetro interno de la tubería de 2" (50mm) podemos calcular el caudal máximo de trabajo:

$$Q_{max} = v * A = 1,5 \text{ m/s} * \pi D^2/4 = 0,0029 \text{ m}^3/\text{s} = 176,7 \text{ L/min}$$

Este caudal es más que suficiente ya que la cantidad máxima de volumen a cargar es de 200 lts (capacidad máxima del tanque de pre-mezcla, no se llena del todo para facilidad del mezclado). Según la velocidad de flujo normada, el volumen total se podría descargar en 1,13 minutos. No obstante, este punto puede ser el más problemático de todo el sistema debido a las obstrucciones de sólidos. Así, el correcto funcionamiento de la carga del reactor debe ser contrastado con la experiencia.

3.3.3.6. Tubería de descarga del biodigestor.

En este caso la tubería puede ser de menor diámetro ya que a la salida, el sustrato va a estar más descompuesto y la mezcla presuntamente estará más diluida. Se opta por una tubería de 1" con los accesorios y válvulas pertinentes. En este caso se optó por utilizar la válvula compacta de PVC de 1" y aparte la universal de 1" de PP. La universal sirve para futuros desensambles, mantenimientos o si se tapa la manguera. La manguera (de PE) se une a la tubería por medio de un neplo flex de PVC para unión rosca manguera de 1". Debe ir con abrazadera para asegurar la adherencia de la manguera al neplo.

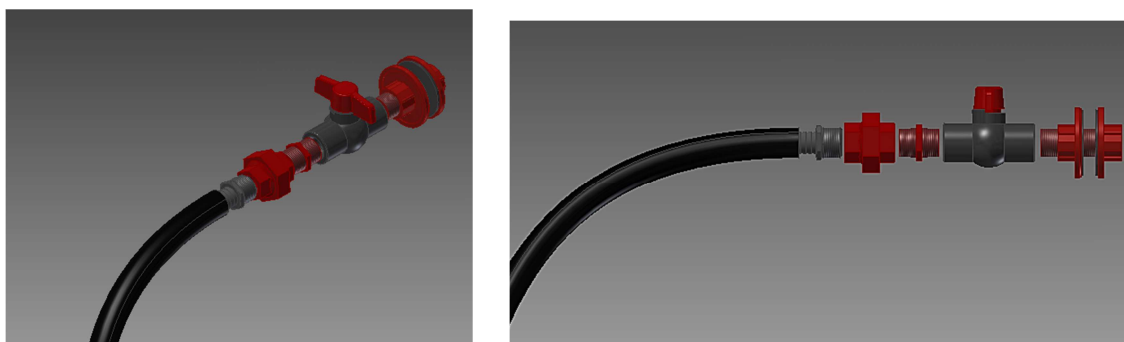


Figura 3.9 Isometría y vista frontal de tubería de salida de 1"

El caudal de salida máximo sería:

$$Q_{max} = v * A = 1,5 \text{ m/s} * \pi (0,025)^2/4 = 0,00074 \text{ m}^3/\text{s} = 44,18 \text{ L/min}$$

Esta estrangulación del caudal que sufre a la salida (con respecto al caudal de entrada) es para evitar que se mezcle el flujo de entrada al digestor con la salida de sustrato descompuesto cuando se abran las dos válvulas y se quiera alimentar y descargar biomasa. Si existen problemas de taponamiento, se podría optar por el siguiente diámetro de tubería (1 ¼").

3.3.3.7. *Tubería de salida de biogás.*

Esta es de PP de ½” y es recomendada por Plastigama para instalación en el Biofermentador. El flujo del gas es bajo (máximo 600 L/día si es 100% eficiente el digestor), está alrededor de los 0,42 L/min. El caudal máximo para esta tubería sería:

$$Q_{max} = v * A = 1,5 \text{ m/s} * \pi (0,013)^2 / 4 = 0,0002 \text{ m}^3/\text{s} = 12 \text{ L/min}$$

Lo cual es sobrado para la cantidad de biogás producido. Lamentablemente es el diámetro más pequeño disponible en el mercado.

Cuenta con una válvula de bola para controlar la entrada y salida de gas (para mantenimientos en línea posterior). Las Tees que incorpora son para acoplar el manómetro (en la primera T) y para acoplar la válvula de alivio de presión y salida a manguera de biogás en la segunda T.

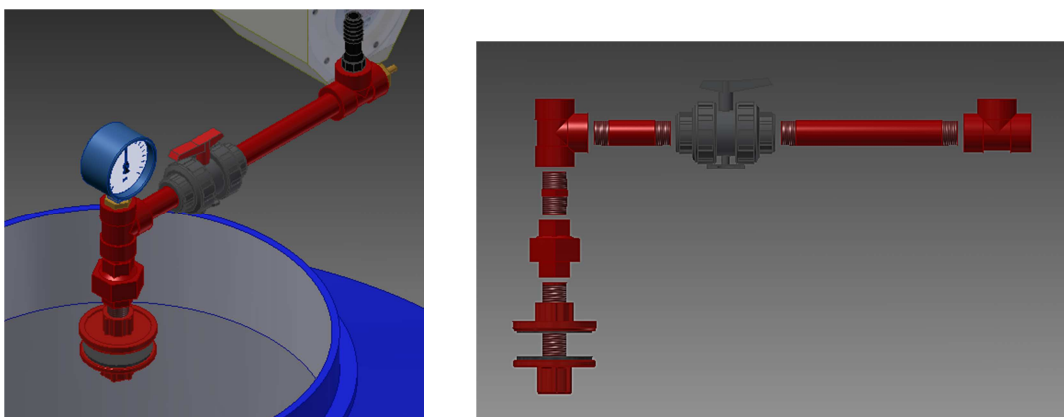


Figura 3.10 Isometría y vista frontal de tubería de biogás de 1/2”

3.3.3.8. *Válvula de alivio de presión.*

Esta válvula aprovecha la columna de agua para setear la presión máxima de operación deseada. La idea es formar un recipiente largo de 1.5m de alto con el tubo de desagüe y el tapón. Se introduce la manguera de ½” de PE por la boca superior del tubo hasta abajo el tapón de tal manera que se pueda llenar el tubo con la altura deseada de agua para lograr un sistema presurizado hasta la presión de la columna de agua. Como el biogás va a seguir

produciéndose continuamente en el biodigestor (mientras tenga materia que descomponer), el sistema de almacenamiento se va a llenar hasta llegar a la presión seteada. La presión sobrante se aliviará al vencer la columna de agua que en este caso por comodidad del usuario no debe ser más alta de 1.5m (para que la pueda rellenar sin problemas).

$$P = \rho gh$$

$$P = 1000 \frac{kg}{m^3} * 9,8 \frac{m}{s^2} * 1,5 m = 14,7 kPa \equiv 2.13 \text{ psig}$$

La manguera se acopla a un neplo flex de ½” con una abrazadera para asegurar hermeticidad, y este se enrosca en la salida superior de la segunda T de la salida de biogás.

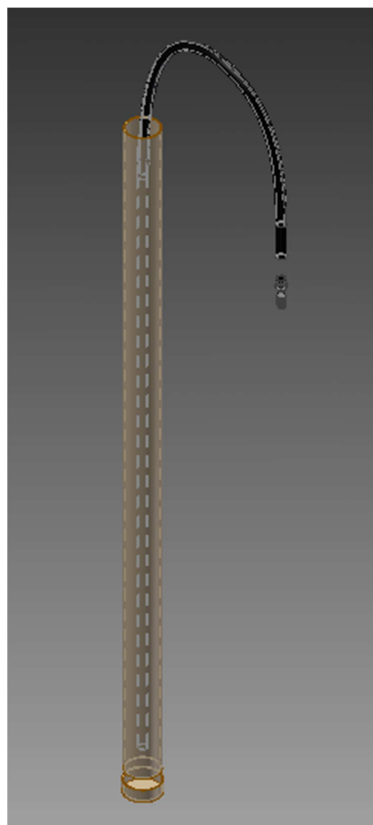


Figura 3.11 Sistema de alivio de presión

3.3.3.9. *Conexión a medidor de caudal y almacenamiento.*

En este caso ya se puede usar manguera por facilidad del recorrido al no necesitar codos para cambiar su trayectoria. Los flujos de gas como vemos siempre son bajos por lo

que el diámetro de la manguera es suficiente y además son muy accesibles en el mercado. El medidor de gas es necesario solo en este prototipo para medir el desempeño del digester más en un caso real se lo omite para abaratar costos. La válvula check es de ½” de baja presión y acoplada con reductores rosca macho de ½” a acople manguera macho de ¼”. Se aseguran todos los terminales de las mangueras a los adaptadores roscables con abrazaderas. Por facilidad, se acopla un tubo de llanta como almacenamiento de biogás, por lo que es fácil de adquirir en cualquier vulcanizadora. Las conexiones y la pistola soplete también son baratas y fáciles de adquirir en cualquier ferretería.

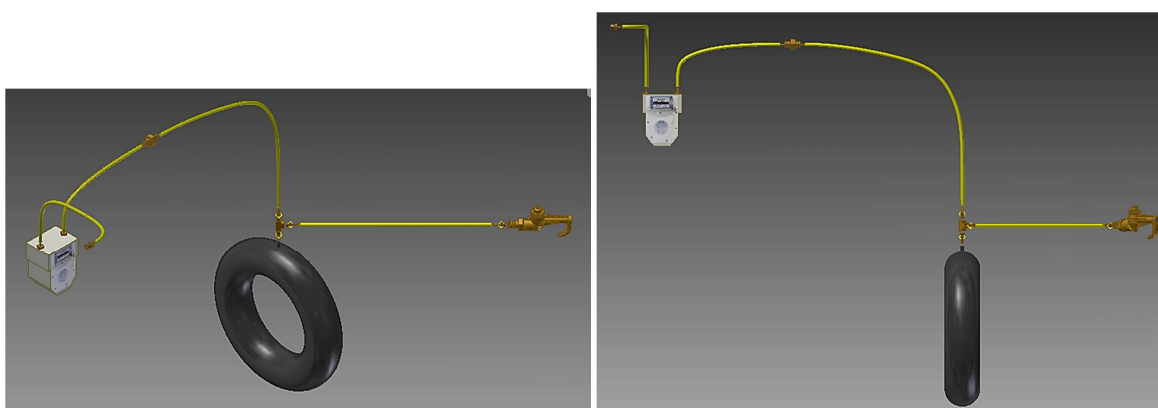


Figura 3.11 Isometría y vista frontal medición y almacenamiento de biogás

3.3.3.10. *Instrumentación básica.*

Todos los materiales resistentes a la corrosión:

- Un termómetro bimetálico de acero inoxidable, resistente a la intemperie y el vástago debe ser de 4” o mayor (para mejor medición del interior). Se acopla al tanque con adaptador de PP de ½” y se lo une con reductor de latón hembra de ¼”. Se instala a media altura del biodigestor para obtener la temperatura media del sustrato.
- El visor de nivel igual va con adaptadores y codos de ½” de PP. El tubo del nivel debe ser transparente y resistente a la corrosión de la biomasa. Se utiliza manguera de vinilo de ½” o 3/8” y de 0,75 m de largo y se la acopla con neplos flex de ½” y abrazadera para no permitir infiltraciones.

- Para evitar hacer muchas perforaciones en el tanque (lo cual pone en riesgo la hermeticidad) se instala el manómetro en la tubería de salida de biogás. Este debe ser de materiales resistentes a la corrosión del gas y a la intemperie, calor solar y lluvia. Se utiliza un manómetro pequeño, de poca presión (pues llegamos máximo a 2,13 psi) y se lo acopla a la tubería de PP con reductor de latón similar al utilizado en el termómetro.

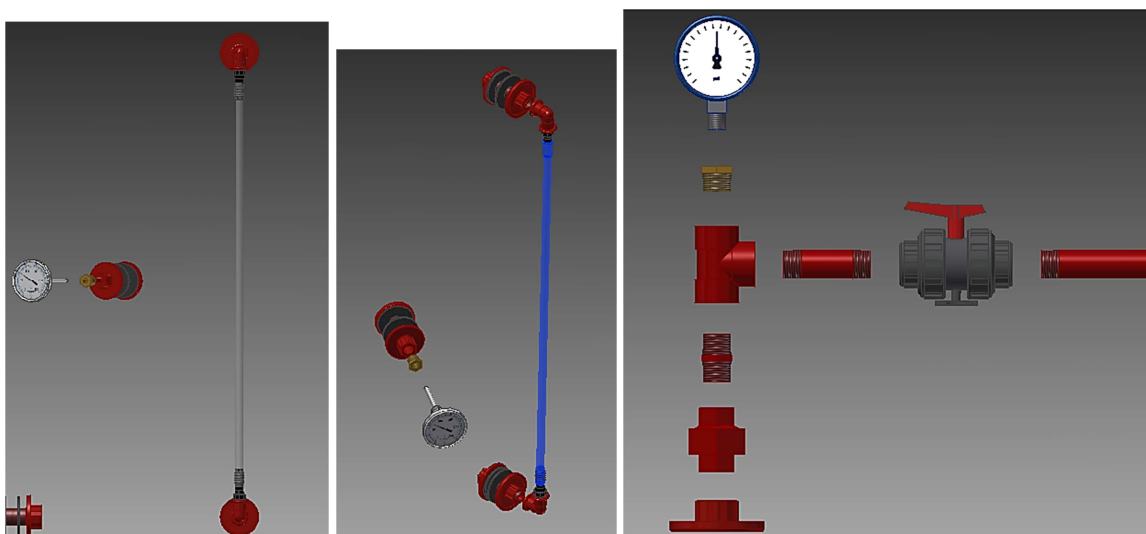


Figura 3.12 Termómetro con visor de nivel y frontal de manómetro

3.4. Procura, construcción y pruebas

3.4.1. Adquisición de materiales.

Se realizó una búsqueda exhaustiva, en el mercado ecuatoriano, sobre los materiales necesarios y sus precios. Muchos condicionantes del diseño fueron escogidos por la disponibilidad y costo en el mercado local. Se encontró un buen proveedor de tanques Plastigama, tubería y materiales de construcción en general. Además, se adquirió algunas partes y herramientas en Kywi, ferreterías y talleres comunes. Lo ideal, para reducir costos, sería adquirir la mayoría de materiales en un solo proveedor, por ejemplo el descrito primero: Mario Rubio Cía. Ltda. Por cuestiones de cambio de diseño preliminar y pruebas, se adquirió muchos materiales de distintos proveedores. Esto no es mayormente

negativo ya que demuestra la versatilidad y facilidad de adquisición y adaptación del diseño, según disponibilidad en el sitio en el que se encuentre. La instrumentación como el termómetro y el manómetro se consiguió a buen precio sin comprometer la calidad en Maquinarias Henriques C.A.

A continuación un detalle de los costos de materiales y herramientas necesarias para la construcción del diseño propuesto:

ITEM	CTIDAD	N° DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNIT.	PRECIO TOTAL
1	1	Biodigestor	600 lts. HDPE con abrazadera metalica	\$ 99,44	\$ 99,44
2	2	Adaptador tanque 2"	Dos bridas PP con cauchos	\$ 7,94	\$ 15,88
3	4	Caucho adaptador 2"		\$ -	\$ -
4	4	Caucho extra 2"	NBR o EPDM	\$ 0,50	\$ 2,00
5	1	Tanque Premezcla	250 lts. HDPE Tipo botella (con kit 1/2")	\$ 51,41	\$ 51,41
6	1	Adaptador tanque 1"	Dos bridas PP con cauchos	\$ 4,33	\$ 4,33
7	2	Caucho adaptador 1"		\$ -	\$ -
8	1	Válvula de bola compacta 1"	PVC	\$ 3,39	\$ 3,39
9	4	Adaptador tanque 1/2"	Dos bridas PP con cauchos	\$ 2,00	\$ 8,00
10	8	Caucho adaptador 1/2"		\$ -	\$ -
11	2	Codo HH 90° 1/2"	PP (incluido en kit tanque)	\$ -	\$ -
12	3	Neplo flex 1/2"	rosca manguera PVC	\$ 0,16	\$ 0,48
13	0,75	Tubo visor nivel 1/2"	manguera transparente vinilo	\$ 1,86	\$ 1,40
14	1	Bancada	6m de varilla acero diam. 12mm	\$ 21,00	\$ 21,00
15	2	Neplo con tuerca 2"	PP	\$ 2,57	\$ 5,14
16	2	Codo HH 45° 2"	PP	\$ 5,88	\$ 11,77
17	1	Neplo 10cm 2"	PP	\$ 2,48	\$ 2,48
18	2	Reductor macho-hembra 1/2 x 1/4	Latón NPT	\$ 2,17	\$ 4,34
19	1	Tapa Biodigestor	HDPE (con tanque biofermentador)	\$ -	\$ -
20	1	Empaque tapa biodigestor	EPDM (con tanque biofermentador)	\$ -	\$ -
21	1	Unión universal 1/2"	PP (incluido en kit tanque)	\$ -	\$ -
22	1	Neplo con tuerca 1/2"	PP	\$ 0,44	\$ 0,44
23	2	Tee roscada HHH 1/2"	PP	\$ 0,49	\$ 0,98
24	1	Termómetro bimetalico 0 - 100 °C	Acero Inoxidable	\$ 43,20	\$ 43,20
25	1	Neplo con tuerca 1"	PP	\$ 0,75	\$ 0,75
26	1	Manómetro 0-30psi	Aluminio, latón	\$ 10,54	\$ 10,54
27	1	Unión universal 1"	PP	\$ 3,90	\$ 3,90
28	1	Neplo flex 1"	rosca-manguera PVC	\$ 0,36	\$ 0,36
29	1	Neplo 6cm 1/2"	PP (incluido en kit tanque)	\$ -	\$ -
30	1	Válvula de bola compacta 1/2"	PVC (incluido en kit tanque)	\$ -	\$ -
31	1	Neplo 15cm 1/2"	PP	\$ 0,38	\$ 0,38
32	1	Reductor macho macho 1/2" x 1/4"	Rosca-manguera. Latón	\$ 4,02	\$ 4,02
33	1	Tanque Biol	60 lts. HDPE	\$ 25,00	\$ 25,00
34	1	Tubo flex 1"	1m. LDPE	\$ 0,63	\$ 0,63
35	1	Válvula compacta con universal 2"	PVC. ABS	\$ 14,35	\$ 14,35
36	2	Tubo flex 1/2"	2m. LDPE	\$ 0,40	\$ 0,80
37	1,5	Tubo desagüe 75mm	1.5m. PVC	\$ 3,50	\$ 5,25
38	1	Tapon hembra desagüe 75mm	PVC	\$ 1,75	\$ 1,75
39	1	Medidor Gas	Hierro fundido. Préstamo LADEA	\$ -	\$ -
40	3	Manguera gas 5/16" (1)	3m. total Caucho PVC con nylon trenzado	\$ 1,04	\$ 3,11
42	1	Valvula Check gas	Latón. Bronce	\$ 15,00	\$ 15,00
44	4	Terminal 5/16" x 1/8" NPT	rosca manguera macho. Latón	\$ 0,91	\$ 3,64
45	1	Tee HHH 1/8"	Latón	\$ 2,27	\$ 2,27
46	1	Almacenamiento biogás	Tubo de llanta. Caucho	\$ 10,00	\$ 10,00
48	1	Pistola soplete 1/8"	Aluminio	\$ 6,72	\$ 6,72
49	11	Abrazadera 13-23 x 8mm	Acero Inoxidable	\$ 0,34	\$ 3,74
50	1	Abrazadera flex 1"	Acero Inoxidable	\$ 1,92	\$ 1,92
51	1	Consumibles varios	Silicon, teflón, sellante	\$ 10,00	\$ 10,00
				Subtotal	\$ 399,81
				IVA 12%	\$ 47,98
				TOTAL	\$ 447,78

3.4.2. Construcción de la planta.

Una vez adquiridos los materiales se dispone a armar las partes. Primeramente se define la ubicación donde irá instalado el prototipo para pruebas.

3.4.2.1. Ubicación de la planta prototipo.

El sistema debe poder ser utilizado en cualquier tipo de ambiente, ya sea altiplano, tropical, costa, sierra u oriente. La planta prototipo será construida y analizada en el Laboratorio de Energías Alternativas (LaDEA) de la Universidad San Francisco de Quito, ubicado en Cumbayá, Quito, Ecuador.

Cumbayá es una parroquia rural al este de Quito, ubicada en el valle de Tumbaco y del río San Pedro. LaDEA está a una altura de 2300 m.s.n.m. La temperatura media es de 16,78 °C llegando a máximas de 40 °C con mínimas de 10 °C. La radiación solar media es 5.5 kWh/m²/día (CONELEC, 2008). Durante el mediodía y tarde soleados, no es raro encontrar temperaturas sobre los 30°C.

Se ubica el biodigestor al aire libre de tal manera que reciba la mayor parte de luz solar para calentarse. Se debe disponer donde no entorpezca el paso de las personas y no moleste con olores y gases inflamables. Se necesita un espacio con pendientes naturales o donde se pueda remover tierra para obtener los distintos niveles de operación. Puede estar cerca de un campo o espacio donde se pueda secar los lodos, o donde se pueda hacer compostaje con el material parcialmente degradado que sale del digestor.

3.4.2.2. Descripción de ensamble del sistema.

En primer lugar, se realizan las perforaciones respectivas en los tanques biodigestor y premezcla para la tubería de 2" de alimentación, para la de 1" de descarga y para la salida de biogás e instrumentación de ½". Se utiliza un taladro con copas para perforar.

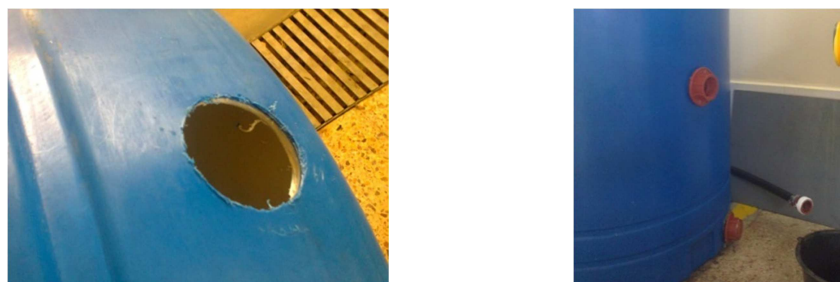


Figura 3.13 Perforaciones en tanques para las distintas conexiones.

A continuación se instala los adaptadores en los orificios realizados según correspondan. Se pone un poco de silicona alrededor de la circunferencia del orificio para que al juntarse con los cauchos, asegure la hermeticidad por completo. Para los adaptadores de 2" y opcional el de 1", debe ir con un par de cauchos extras a cada lado de la pared, para que haya mayor apriete.



Figura 3.14 Sellantes y juntas utilizados en los adaptadores

Se sigue armando el resto de tubería y accesorios poniendo teflón en las roscas para asegurar una junta hermética. Para la tubería de 2" es necesario usar un sellante especial (Gasket Sealant Type 1) debido a que el uso del teflón, no evita las infiltraciones.

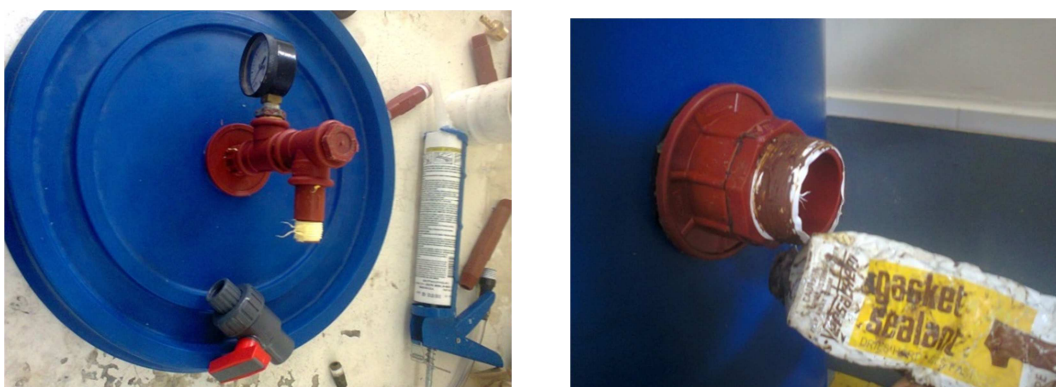


Figura 3.15 Ensamble de tuberías con teflón y Gasket Sealant Type 1 para alimentación

Para la tapa del biodigestor, se le puso una capa de silicona sobre la superficie del empaque que tiene contacto con la tapa en sí, y otra capa de silicona en la superficie inferior del empaque que tiene contacto con el filo de la boca del tanque.



Figura 3.16 Capa de silicona por debajo y por encima del empaque de la tapa

Para las mangueras se ajusta bien las abrazaderas para que no haya escape de fluidos.



Figura 3.17 Fijación de distintas mangueras a acoples con abrazaderas metálicas

Se llega a un punto en el ensamble para realizar las pruebas de hermeticidad del biodigestor. Se dejó que el silicón y sellante aplicados se sequen y curen por al menos 24 horas antes de someterlo a carga hidráulica y presión.



Figura 3.18 Sistema listo para pruebas de hermeticidad del digestor

3.4.3. Pruebas de hermeticidad.

Primero se llenó los tanques con agua hasta el nivel deseado de trabajo (400 – 450 L). Se abrió la válvula de alimentación y se mantuvo cerrada la de descarga. Se revisó si existen fugas y goteras en cada una de las uniones mojadas de las tuberías y tanques.

Luego que pasó esta prueba visual y corregida cualquier fuga, se conectó la manguera de salida de biogás a una pequeña bomba de aire que presurizó el tanque lentamente. Esta bomba es pequeña de 1/50 HP a 1550 rpm. Maneja presiones de 0 – 20 psi. El flujo es moderado lo que permitió monitorear lentamente el aumento de presión dentro del tanque.



Figura 3.19 Pruebas de hermeticidad con pequeña bomba de aire de baja presión

La primera parte de esta prueba es someter el tanque a la mayor presión posible hasta que el sistema colapse en cualquiera de las partes. Llegó hasta 3 psi y la única parte que colapsó fue la abrazadera de la tapa que se abrió sola y la tapa del tanque salió disparada hacia el aire. Se debió poner un seguro en la abrazadera para prevenir que pase esto. De todas maneras, esto demuestra la presión máxima de trabajo para que la tapa no pierda su adherencia al tanque y escape el gas. Si se somete el tanque a esta presión durante largo

tiempo, tarde o temprano, así tenga seguro la abrazadera, el material se fatigará y cederá a la presión del gas perdiendo la hermeticidad.

Por esta razón, la presión de diseño de 2,13 psi, condicionada por la altura de cabeza de agua de 1,5 m, nos da un factor de seguridad:

$$FS = \frac{3 \text{ psi}}{2,13 \text{ psi}} = 1,41$$

Lamentablemente, después de la explosión, la tapa y su empaque sufrieron algún tipo de daño que no permitió mantener la presión. Se tuvo que hacer algunas adecuaciones en la tapa para lograr mantenerla presionada.



Figura 3.20 Adecuaciones para reparar el seguro de la tapa del digestor

En un futuro, en unidades nuevas, se debe prever esto y poner seguro en la abrazadera, para que la presión acumulada en el tanque no la vaya a abrir y dañar su seguro. Además con una presión máxima de alivio de 2 psi (1,4 m de columna de agua) se evita fatigar al material.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

4.1. Diseño y construcción

Primeramente, se hace un análisis del diseño propuesto y su costo, comparado con los digestores tubulares de Preston utilizados en Bolivia y Perú. Se compara la complejidad de los diseños, sus características, la cantidad de materiales y costos en la siguiente tabla.

Diseño	No. Materiales	Costo Total USD\$	Complejidad del diseño	Accesibilidad a materiales	Impacto visual	Resistencia	Tiempo vida (años)	Volumen
Tubular (bolsa)	14 – 18	180 – 280	Bajo	Alta	Alto	Baja	5 – 10	5 – 10 m ³
Tanque vertical	45 – 48	350 – 400	Moderado	Alta	Bajo	Alta	25 – 50	0,6 m ³

Tabla 4.1 Comparación entre digestor tubular de bolsa y de tanque vertical propuesto

A pesar de que el diseño tubular es menos complicado, con un menor número de piezas, el tiempo de instalación del diseño de tanque vertical, por ser más compacto y roscable, es más rápido de ensamblar. Además la ventaja del tanque vertical es que se puede mezclar el sustrato descargando y volviendo a alimentar tantas veces como se desee revolver. De esta manera se puede optimizar la producción de biogás y evitar asentamientos de lodos.

La accesibilidad de materiales es alta para ambos pero el tanque tiene un menor impacto visual y retiene mejor los olores. Además su resistencia es más alta que la bolsa y su tiempo de vida hasta 10 veces mayor.

La ventaja del tubular es que es bastante económico y accesible, y se puede hacer de grandes tamaños lo que permite tratar mayor cantidad de biomasa. El tanque por su pequeño volumen solo permite bajas cargas diarias.



Figura 4.1 Planta prototipo de biogás y biol en funcionamiento

4.2. Puesta en marcha de la planta prototipo

Una vez superadas las pruebas de hermeticidad, se realiza las pruebas en caliente o con biomasa. Se pretende arrancar el biodigestor de tal manera que esté listo para operar continuamente (ambiente anaerobio y con flora microbiana). Para una producción óptima de biogás se recomienda la co-digestión y mayor dilución en agua (Moncayo, 2008). A continuación, las tareas realizadas para el arranque del biodigestor.

- Se obtuvo estiércol fresco de ganado. Se seleccionó el estiércol más fresco debido a que este tiene aproximadamente 20% de sólidos totales. Se trata de evitar, vegetación o material (piedras, inorgánicos) que puedan obstruir el flujo en las tuberías y el proceso.



Figura 4.2 Recolección, pesaje y carga de estiércol

- Se mezcló en una proporción de 1,5 – 1,6 litros de agua por cada kilogramo de estiércol fresco (para mejor dilución de la mezcla).



Figura 4.3 Combinación agua-estiércol 1,6 : 1 en tanque de premezcla

- Se alimenta el digestor paulatinamente según la disponibilidad del estiércol y para que cada carga tenga un tiempo de hidrólisis de al menos 24 horas. Para este caso se cargó de la siguiente manera.

DIA	CARGA ESTIER (kg)	CARGA AGUA (L)	CARGA DIGE (L)	CARGA PRE (L)	CARGA BIOL (L)
1	97,39	122	103	116,39	0
3	49	134	230,2	135,1	0
5	55	51	337,8	162,3	55
7	0	20	387,9	127,8	12
13	0	0	457,5	70,5	0
TOTAL	201,39	327	457,5	70,5	0

Tabla 4.2 Procedimiento de carga de biodigestor hasta el volumen de trabajo

- Se diluyó la mezcla dependiendo de la viscosidad de esta. Por eso algunos días se puso menos agua y otros más, pero a la final se logró una proporción de: $327 \text{ L} / 201,39 = 1,62 \text{ L} : 1 \text{ kg}$.
- Se debe mezclar bien para eliminar todo residuo grande y que no exista taponamiento de tubería.



Figura 4.4 Mezcla para eliminación de sólidos y dilución del sustrato

- En el caso de presentarse taponamiento, se debe utilizar un alambre o tubo flexible para pasarlo por la tubería obstruida. Si esto no lo destapa se debe desarmar en la universal de la tubería afectada y eliminar las incrustaciones que bloquean el flujo.
- Otra manera de destapar la tubería afectada para no desarmar el equipo, es esperar unas 12 horas para que, o por temperatura o por actividad microbiana, se reduzca el oxígeno existente y se genere una presión negativa en el digestor como se muestra. Esto crea una succión en la tubería de alimentación, que destapa la mayoría de incrustaciones.



Figura 4.5 Presión negativa generada en el biodigestor, ayuda a destapar tuberías

- Una vez cargado el estiércol, se llegó al nivel de trabajo deseado (alrededor de 450 L o 75% del volumen total del tanque) y se registra los datos y resultados.



Figura 4.6 Nivel de trabajo del digester logrado

4.3. Análisis de resultados

4.3.1. Análisis y resultados durante el período de carga (día 1 – día 13).

Se controló las cantidades tanto de estiércol como de agua ingresados en el sistema. También se analizó el comportamiento del biodigestor mediante observación y registro de presión y temperatura. Los primeros días no se midió el volumen de gas generado ya que como se abría la válvula de salida de gas y algunos días permanecía abierta para que pueda

fluir el sustrato del tanque de premezcla al digestor, el ambiente no era anaerobio para la generación adecuada de biogás.

Para el cálculo del TRH se tomó la temperatura a diferentes horas de un día, y las que no se pudo registrar, se consultó en el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), para poder sacar un promedio real de temperatura en el sitio que va a operar.

HORA	TEMP AMB (°C)
730	10
910	20
1000	24
1130	28
1200	29
1300	32
1400	30
1520	25
1620	25
1700	24
1800	18
1900	16
2000	16
2100	15
2200	15
2300	14
2400	13
100	12
200	10
300	10
400	9
500	9
600	10
Promedio	18

Tabla 4.3 Temperatura promedio medida en Cumbayá

Utilizando la información de la Tabla 2.4, se puede hacer una interpolación para determinar el TRH para la temperatura de 18 °C.

$$x_1 = 10; \quad y_1 = 60; \quad x_2 = 20; \quad y_2 = 30; \quad x = 18$$

$$y = y_1 + (y_2 - y_1) \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = TRH$$

$$TRH = 36 \text{ días}$$

A continuación una tabla de los datos registrados durante el período de carga.

DIA	TEMP AMB (°C)	CARGA ESTIER (kg.)	CARGA AGUA (m ³)	NIVEL DIGE. (m)	VOL. DIGE. (m ³)	TEMP DIGE. (°C)	PRESION DIGE (PSIG)	NIVEL PRE (m)	VOL PRE (m ³)	TEMP. PRE. (°C)	GAS EXT (m ³)	COMENTARIOS
1	24	57	0,065	0,179	0,1030	24	0	0,055	0,0200	18		
1	18	40,39	0,057	0,179	0,1030	18	0	0,32	0,1162	18		
2	24	-	0,025	0,195	0,1122	24	0	0,405	0,1471	20		SE TAPA TUBERIA, SE ESPERA 12 HR
3	24	-	0,056	0,228	0,1312	25	0	0,515	0,1870	20		SE VUELVE A TAPAR TUBERIA
3	24	49	0,053	0,4	0,2302	25	0	0,372	0,1351	20		SE PASA DE 25 L EN 25 L
4	20	-	-	0,488	0,2808	25,5	NEGATIVA	0,377	0,1369	24		SE DESTAPA TUBERIA TOTALMENTE
5	23	-	-	0,52	0,2993	24,5	1,3	0,162	0,0588	20		
5	16	55	0,051	0,587	0,3378	24	1,3	0,447	0,1623	16		
6	28	-	-	0,62	0,3568	31	1,5	0,388	0,1409	20		FUERTE OLOR A BIOGAS CERCA DIGESTOR
7	10	-	-	0,628	0,3614	15	NEGATIVA	0,407	0,1478	18		
7	29	-	0,02	0,674	0,3879	29	1	0,352	0,1278	22	0,01463	SE SACA BIOGAS HASTA TENER PRESION 0
8	32	-	-	0,718	0,4132	32	1,5	0,19	0,0690	23	0,01932	SE SACA BIOGAS HASTA TENER PRESION 0
13	28	-	-	0,795	0,4575	28	1,7	0,194	0,0705	19	0,01671	SE SACA BIOGAS HASTA TENER PRESION 0
	23,1	201,39	0,327	0,795	0,4575	25		0,194	0,0705	19,8	0,05066	

Tabla 4.4 Datos registrados durante el período de carga

El porcentaje de sólidos totales se estima con los 201,39 kg de estiércol al 20% de sólidos totales que son 40,28 kg. Se considera la densidad del agua 1000 kg/m³ y que la materia orgánica tiene similar densidad.

Dilución total de sustrato sería: $\frac{40,48kg}{(201,39+327)kg} (100) = 7,66\%$ El cual está dentro del rango recomendado de dilución (5 – 8%).

Con el TRH calculado, se puede determinar la carga diaria del digestor despejando la Ecuación 2.1:

$$\dot{V}_{carga\ diaria} = \frac{V_{Digestor}}{TRH} = \frac{450L}{36\ días} = 12,5\ L/día$$

Los 12,5 L/día deben estar en dilución 1,5 : 1.

$$\% \text{ materia orgánica en sustrato} = \frac{1}{2,5} (100) = 40\%$$

$$Carga\ Materia\ Orgánica = \frac{12,5kg}{día} (0,4) = \frac{5kg}{día}$$

Este parámetro nos indica la cantidad de desechos orgánicos (estiércol o residuos) que se debe cargar en el digestor cada día en una dilución de 1,5 : 1. Se podría cargar pasando hasta 4 días, cargando 20 kg de estiércol diluidos en 30 litros de agua.

Una vez logrado el nivel de trabajo deseado (450 L aproximadamente) se mide la producción de biogás. Se toma en cuenta los 50 L de gas producidos los últimos días de carga. Con una relación de gases de Boyle considerando temperatura constante del gas:

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

$$V_2 = \frac{P_1V_1}{P_2}$$

La diferencia de volúmenes, es la cantidad de biogás extraída.

4.3.2. Análisis y resultados durante la estabilización (día 7 – día 31).

A continuación, el resto de la tabla con los parámetros de interés:

DIA	TEMP AMB (°C)	CARGA ESTIER (kg.)	CARGA AGUA (m ³)	NIVEL DIGE. (m)	VOL. DIGE. (m ³)	TEMP DIGE. (°C)	PRESION DIGE (PSIG)	NIVEL PRE (m)	VOL PRE (m ³)	TEMP. PRE. (°C)	NIVEL BIOL (m)	VOL BIOL (m ³)	CONTEO GASÓM.	GAS EXT (m ³)	
7	29	-	0,02	0,674	0,3879	29	1	0,352	0,1278	22				0,01463	SE SACA BIOGAS HASTA TENER PRESION 0
8	32	-	-	0,718	0,4132	32	1,5	0,19	0,0690	23				0,01932	SE SACA BIOGAS HASTA TENER PRESION 0
13	28	-	-	0,795	0,4575	28	1,7	0,194	0,0705	19				0,01671	SE SACA BIOGAS HASTA TENER PRESION 0
13	30	se mezclo	se mezclo	0,796	0,4581	31	1	0,17	0,0617	22	0	0	57,54	0,00979	SE SACA BIOGAS HASTA TENER PRESION 0
14	29	-	-	0,85	0,4892	28	1,5	0,175	0,0636	22			57,552	0,012	SE SACA BIOGAS HASTA TENER PRESION 0
14	29	-	-	0,81	0,4661	31	0	0,212	0,0770	23			57,552	0	SE ABRE LA VALVULA DE ALIMENTACION
17	20	-	-	0,808	0,4650	22,5	1,5	0,21	0,0763	19			57,5725	0,0205	
19	30	-	-	0,808	0,4650	32	1,6	0,209	0,0759	24			57,5915	0,019	
19	24	se mezclo	se mezclo	0,805	0,4633	22	0	0,123	0,0447	22	0,105	0,0095	57,604	0,0125	SE ABRIÓ TODAS LAS VALVULAS
20	21	-	-	0,805	0,4633	22	0,9	0,123	0,0447	20	0,105	0,0095	57,623	0,019	
21	24	-	-	0,815	0,4690	26	1	0,123	0,0447	20	0,105	0,0095	57,716	0,093	
22	24	20	0,02	0,813	0,4679	25	1	0,265	0,0962	19	0,105	0,0095	57,718	0,002	SE PASA TODO EL BIOL A LA PREMEZCLA
23	25	-	-	0,675	0,3885	27	1	0,533	0,1936	23	0	0,0000	57,74	0,022	MAL CERRADA VALVULA DE ALIMENTAC
23	23	se mezclo	se mezclo	0,73	0,4201	24	1	0,343	0,1246	24	0,123	0,0112	57,773	0,033	
25	24	se mezclo	se mezclo	0,753	0,4333	28	1,2	0,254	0,0922	24	0,278	0,0252	57,823	0,05	
27	25	se mezclo	se mezclo	0,756	0,4351	27	1,2	0,255	0,0926	24	0,287	0,0261	57,838	0,015	
29	24	se mezclo	se mezclo	0,758	0,4362	24	1,1	0,245	0,0890	20	0,29	0,0263	57,8485	0,0105	
30	20	-	-	0,751	0,4322	20	0,9	0,255	0,0926	18	0,29	0,0263	57,8645	0,016	
31	24	-	-	0,749	0,4310	24,5	0,9	0,255	0,0926	20	0,29	0,0263	57,88	0,0155	
	25,5	20	0,04	0,749	0,4310	26,5	1,05	0,255	0,0926	21,5	0,29	0,0263		0,40044	

Tabla 4.5 Datos registrados durante el período de estabilización

En la tabla se evidencia que, independientemente de la temperatura, el sistema se encuentra presurizado con gas casi todos los días. Salvo algunas excepciones en las que se procedió a mezclar, o se abrieron las válvulas, la presión pudo haber escapado por alguna de ellas. No obstante, con la experiencia estos escapes se deberían evitar.

La mayoría de datos se concentran en una producción de biogás entre los 0,01 y 0,021 m³ (10 – 21 L). Esto se debió al volumen máximo que tenemos de reservorio en la llanta (alrededor de 20 L de volumen completamente inflado a presión atmosférica). Los valores mayores a estos se debe a que se cargó y se quemó dos veces el biogás en la llanta. El pico de 90 L de biogás se debió a una fuga existente el día que se instaló el sistema de almacenamiento. Este dato nos indica que si se aumenta el tamaño del reservorio de gas, se podría generar y almacenar alrededor de 100 L al día solo utilizando estiércol bovino. Hay que tener en cuenta que la producción de biogás no solo depende de la temperatura sino también del COV y tipo de biomasa.

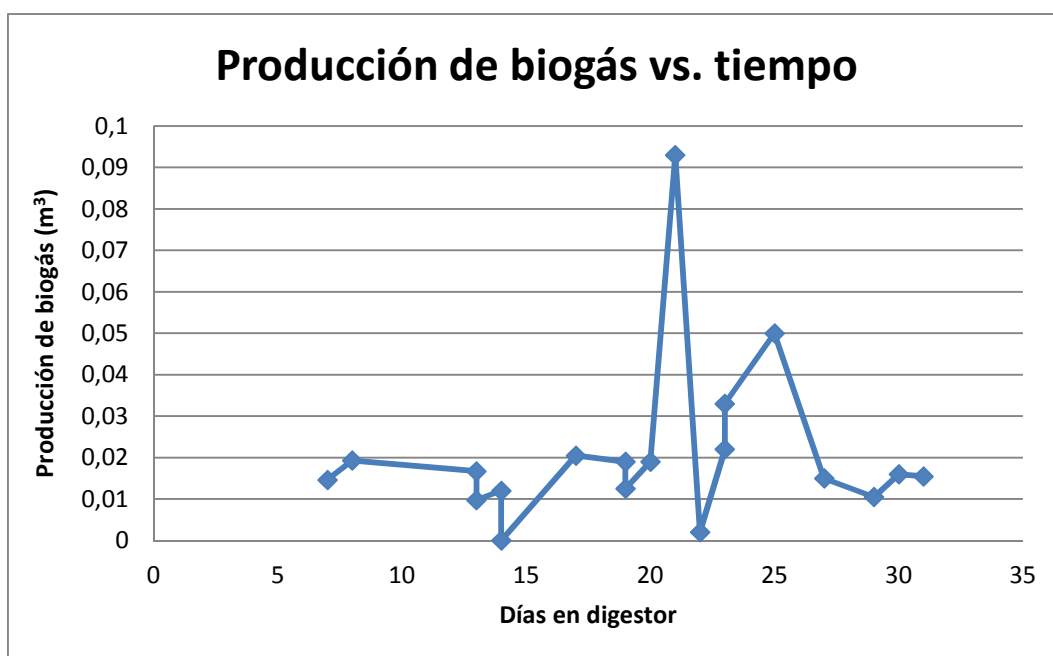


Figura 4.7 Gráfico de producción de biogás por día

Se percibe un fuerte olor a biogás en el séptimo día de estar cargado el digester, por lo que se comienza a extraer y quemar. La producción oscila entre los 10 y 20 L por la razón antes expuesta.

El día 23 y 25, luego de cargar 20 kg de materia orgánica (con la dilución correspondiente), se generan mayor cantidad de biogás que lo usual (33 y 50 L) ya que se llena y se quema dos veces lo almacenado en la llanta (solo por la tarde). Esto da otra idea de cómo aumentaría la producción si se comienza a alimentar el digester regularmente.



Figura 4.8 Quema de biogás generado

En total, se pudo contabilizar y quemar 400 litros de biogás generado. Mucho se escapó por el limitante del almacenamiento. Al final de los 31 días, el sustrato está cada vez más diluido y con menos olores y a los dos días siguientes, la producción de biogás fue casi nula.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al finalizar este proyecto, se logró diseñar, construir y poner en marcha un biodigestor prototipo de bajo costo para el aprovechamiento energético mediante la obtención de biogás, y comercial mediante la obtención de biol. Esto generará un valor real para una familia rural de bajos recursos, al mismo tiempo que incide positivamente en el medioambiente y es una tecnología de mitigación al cambio climático relativamente sencilla y eficaz.

Se estudió y comprendió satisfactoriamente lo concerniente al proceso de digestión anaerobia y la producción de biogás. Es importante utilizar una adecuada biomasa para un correcto funcionamiento y en lo posible co-digestionar una mezcla de desechos para tener la relación de C : N : P óptima para la producción de biogás. Se estudió los diferentes tipos de biodigestores para tener una idea clara del funcionamiento de ellos y poder desarrollar un sistema tipo chino de régimen semi-continuo, con mezcla completa (manual) y de dos etapas.

Para el diseño se partió de un modelo eficaz y muy difundido de biodigestores de bajo costo: los taiwaneses tubulares desarrollados por Preston. Se logró mejorar este modelo con la utilización de tanques robustos de HDPE en lugar de bolsas del mismo material, haciendo al modelo más compacto, agradable, resistente y duradero. Aunque el costo se duplica, siempre es más confiable (resistente) y el tiempo de vida puede ser hasta diez veces mayor al de Preston. Además, la recuperación de la inversión de la planta puede ser bastante rápida por el ahorro energético generado y la comercialización o aplicación del biol en sus propios cultivos

El modelo es construido con materiales de alta accesibilidad en el mercado ecuatoriano, que puede ser adquirido en cualquier ferretería del país. Se puede abaratar costos comprando en un solo proveedor.

En las pruebas de hermeticidad, se pudo obtener la presión máxima del sistema antes de que colapse. Hasta 3 psi puede aguantar la tapa, pero con el condicionante de la altura para la válvula de alivio de 1,5 m (equivalente a 2,13 psi), se logra un FS = 1,41. Se debe colocar correctamente el empaque de la tapa y asegurar la abrazadera con un pasador para que no se abra y la presión haga saltar la tapa bruscamente.

Durante las pruebas en caliente, se pudo comprobar el correcto funcionamiento de la planta. Para ellos se debe diluir muy bien la mezcla por lo que se recomienda utilizar estiércol fresco que es más fácil de diluir.

Al finalizar los 30 días se obtiene un ambiente adecuado dentro del digester para su funcionamiento y alimentación regular con biomasa. Se debe aumentar el volumen del tanque de almacenamiento de biogás para captar al menos 100 L diarios que es lo que se estima puede llegar a generar el digester diariamente y permitirá una hora de cocción.

Como recomendación, se debe evitar estiércol seco, vegetación y piedras pues estos entorpecen el proceso y taponan la tubería. Existió taponamiento de tubería por utilización de estiércol seco que no se desintegro, pero esto permitió comprobar la facilidad de mantenimiento del sistema ya que se podía desarmar fácilmente en las universales de las tuberías para destaparlas. Otra manera muy eficiente de destapar tuberías es aprovechando los cambios de presión que se dan en el digester. Otra recomendación es aumentar el diámetro de la tubería de descarga para que existan menos taponamientos, aunque esta es fácil de destapar desarmando la universal.

El TRH obtenido en el lugar nos obliga a hacer cargas diarias muy bajas (5 kg) pero se podría probar incrementando la carga y ver cómo sale el biol descargado. Si no está muy diluido y aún tiene olores fuertes, quiere decir que le falta degradar y se está alimentando mucha biomasa al digester. Otra opción es tener dos o más plantas para tratar mayor cantidad de desechos.

Se recomienda hacer un buen estudio de co-digestión para optimizar la cantidad de biogás según el sitio y la materia con la que operará la planta. Además, se debe mezclar diariamente el sustrato para optimizar el proceso de digestión, es decir descargar y volver a cargar volúmenes del sustrato para que el flujo lo mezcle y no permita asentamiento de lodos.

6. BIBLIOGRAFIA

- ENT/MAE/URC/GEF. (2012). *Ecuador: Evaluación de Necesidades Tecnológicas para el Cambio Climático. Sector Ganadería*. Quito, Ecuador.
- ENT/MAE/URC/GEF. (2012). *Ecuador: Evaluación de Necesidades Tecnológicas para el Cambio Climático*. Quito, Ecuador.
- Martí-Herrero et al. (2013). *Desarrollo, difusión e implementación de tecnologías apropiadas: Biodigestores en Bolivia*. EnDev-Bolivia GIZ y CIMNE. Bolivia. ISBN: 978-99974-810-2-3.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). *Biomasa: Digestores anaeróbicos*. IDAE. Madrid.
- Moncayo, Gabriel. (2008). *Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás*. s.l.: Aqualimpia Beratende Ingenieure.
- Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial. (1983). *Primer seminario de Biogás. Memoria*. ROCAP. San Salvador.
- López, J. M. (1989). *Digestión Anaeróbica de Lodos de Depuradora*. Tesis doctoral Departamento de Química Inorgánica e Ingeniería Química, Universidad de Alicante. Alicante : s.n.
- Carless, J. (1995). *Renewable Energy: A concise Guide to Green Alternatives*. Walker & Co. London.
- Salamanca, J. A. (2009). *Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un Biodigestor a Escala Piloto para la Generación de Biogás y Fertilizante Orgánico. Tesis de grado*. LADEA-USFQ. Quito.
- Carrillo, L. (2004). *Energía de Biomasa*. 1° ed. Jujuy.
- Álvarez, R. (2004). *Producción anaeróbica de biogás aprovechamiento de los residuos del proceso anaeróbico*. Universidad Mayor de San Andrés, Ingeniería Química, Instituto de Investigaciones en Procesos Químicos. La Paz.
- Riofrío, J., Gallardo, A. (2010). *Factibilidad técnica y económica para el desarrollo de una instalación termoeléctrica de 160 kW mediante la combustión de biogás para la hacienda "Tarragona"*. Tesis de grado. Departamento de Energía y Mecánica – ESPE. Sangolquí.
- Morales, P. (2005). *Digestión anaerobia de lodos de plantas de tratamiento de aguas y su aprovechamiento. Tesis de grado*. Ingeniería Química, Universidad de las Américas Puebla. Puebla.
- Unidad de planeación minera energética. (2003). *Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás*. UPME – Ministerio de Minas y Energía. Bogotá.

- Kiely, G. (1997). *Environmental Engineering*. McGraw-Hill. London.
- Vesiland, A., Hartman, G., Skene, E. (1986). *Sludge management and disposal for the practicing engineer*. Lewis Publishers. Chelsea.
- Clesceri, L., Greenberg, A. (1998). *Standard Methods for the examination of water and waste water*. 20ma ed. Waldorf.
- Schügel, K. (1985). *Bioreaction engineering*. Wiley. Great Britain.
- Martí-Herrero, J. (2008). *Biodigestores familiares: guía de diseño y manual de instalación*. GTZ-Energía. Bolivia.
- Solari, G. (2004). *Ficha Técnica Biodigestores*. Universidad Alas Peruanas. Lima.
- Ismail, O., Adewole, O. (2014). *Evaluating the biogas yield and design of a biodigester to generate cooking gas from human faeces*. “Leonardo Electronic Journal of Practices and Technology”. Issue 25. Jul-Dec. 2014.
- Red Estrategia. (2014). *Tecnologías de producción de biogás*. “Biodisol: energías alternativas, energías renovables, energías limpias, bioenergías”. Red Estrategia SRL. Argentina. Disponible en: <http://www.biodisol.com/que-es-el-biogas-digestion-anaerobia-caracteristicas-y-usos-del-biogas/tecnologias-de-produccion-de-biogas-digestion-anaerobia-biocombustibles/>.
- Biodigestores. (2011). *Biodigestores*. Hidalgo. Disponible en: <http://biodegestores.blogspot.com/>.
- Martí-Herrero, J., et al. (2014). *Low cost tubular digesters as appropriate technology for widespread application: Results and lessons learned from Bolivia*. “Renewable Energy, an international journal”. No. 71. Elsevier Ltd.
- Martí-Herrero, J., et al. (2012). *Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: A heat transfer model*. “Bioresource Technology”. No. 124. Elsevier Ltd.
- Mexichem Ecuador. (2014). *Plastigama: Roscable PP: Tubería y accesorios para agua caliente y fría*. Mexichem Ecuador S.A. Disponible en: <http://www.plastigama.com/>.
- AMANCO. (2006). *Tanque Biofermentador de Polietileno: para producir biofertilizante y multiplicar microorganismos*. Tubosistemas Plastigama de AMANCO. Ecuador.
- Arévalo, E. (2008). *El Polietileno: polietileno de alta densidad*. “Química y Tecnología de Macromoléculas, Curso 2007-2008”. Disponible en: <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso07-08/pe/home.htm>.
- Plásticos Ecuatorianos. (2013). *Productos: Tambores*. Plásticos Ecuatorianos S.A. Disponible en: <http://www.plasticosecuatorianos.com/Productos/tambores.html>.

QuimiNet.com. (2006). *Propiedades del polipropileno*. QuimiNet.com. México. Disponible en: <http://www.quiminet.com/articulos/propiedades-del-polipropileno-2671066.htm>.

AMANCO. (2008). *Válvula de bola compacta roscable para agua fría*. Tubosistemas Plastigama de AMANCO. Ecuador.

Comité Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2011). *NEC-11, Capítulo 16, Norma Hidrosanitaria NHE Agua*. MIDUVI – Cámara de la Construcción. Quito.

Consejo Nacional de Electricidad. (2008). *Atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica*. CONELEC, Corporación para la Investigación Energética. Quito.

7. ANEXOS

7.1. Anexo 1: Emisiones de GEI según sector y número de cabezas de ganado por provincia.

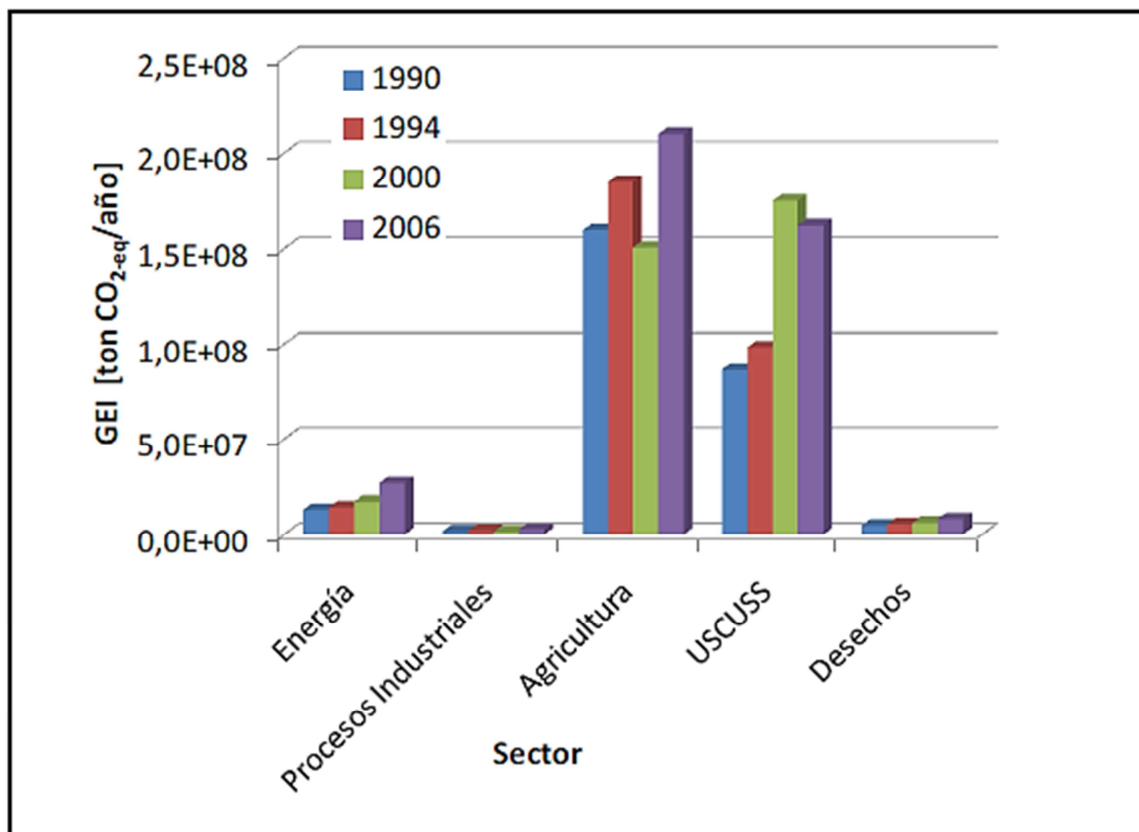


Figura 2: Emisiones de GEI según sector en [ton CO₂(eq)]/año

Fuente: (GEF/PNUD/MAE, 2011)

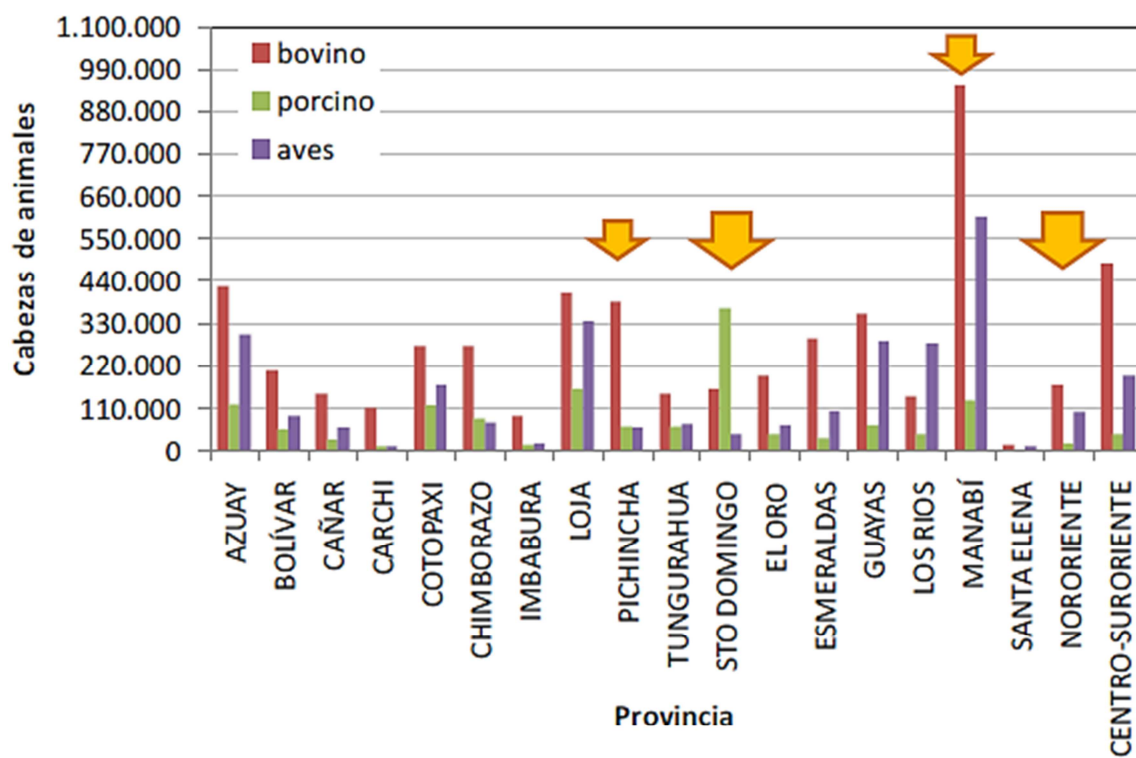
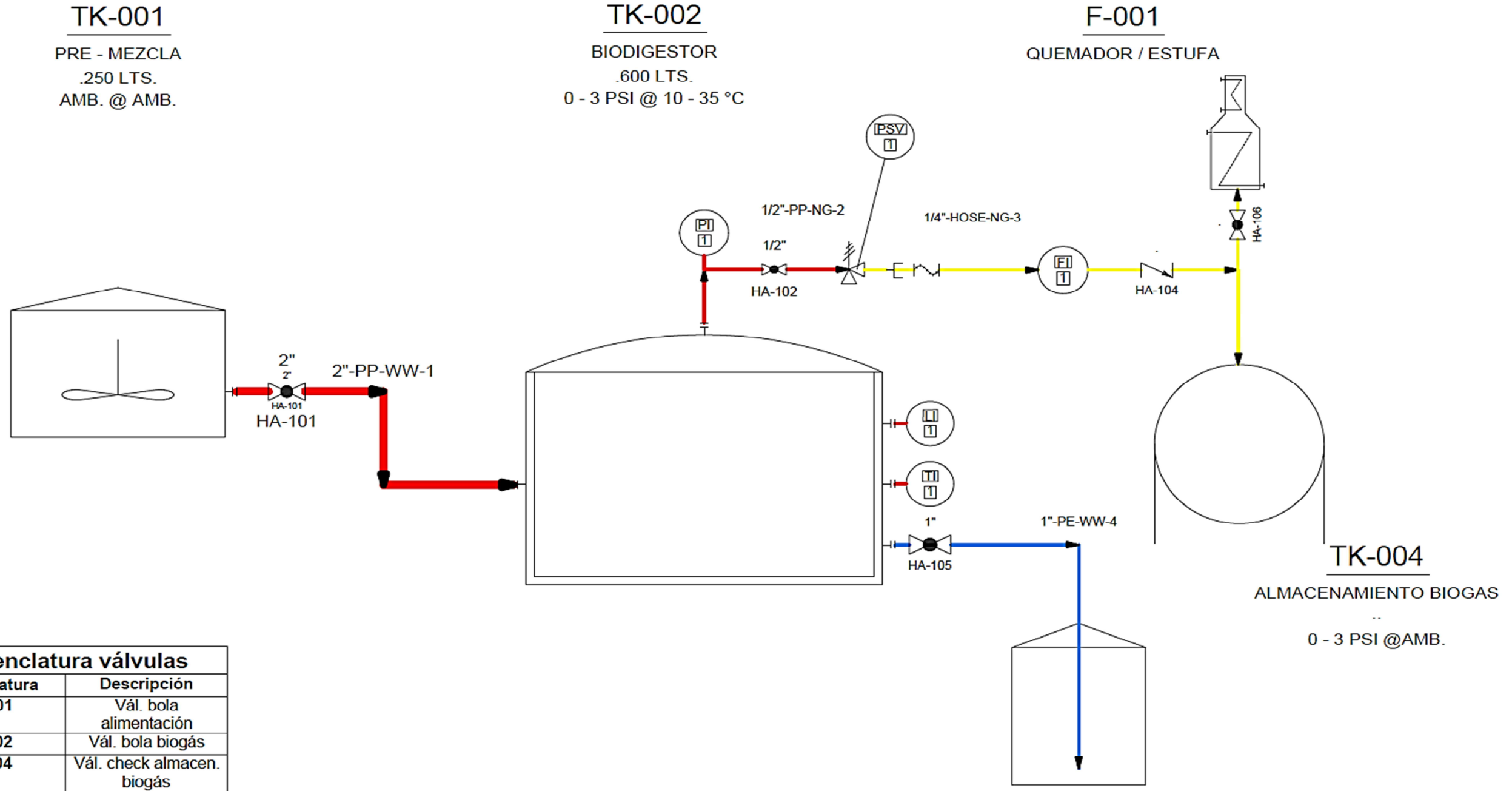


Figura 3: Distribución de cabezas de ganado según provincia

Fuente: (ESPAC-INEC, 2010)

7.2. Anexo 2: Diagrama de equipos, tubería e instrumentación



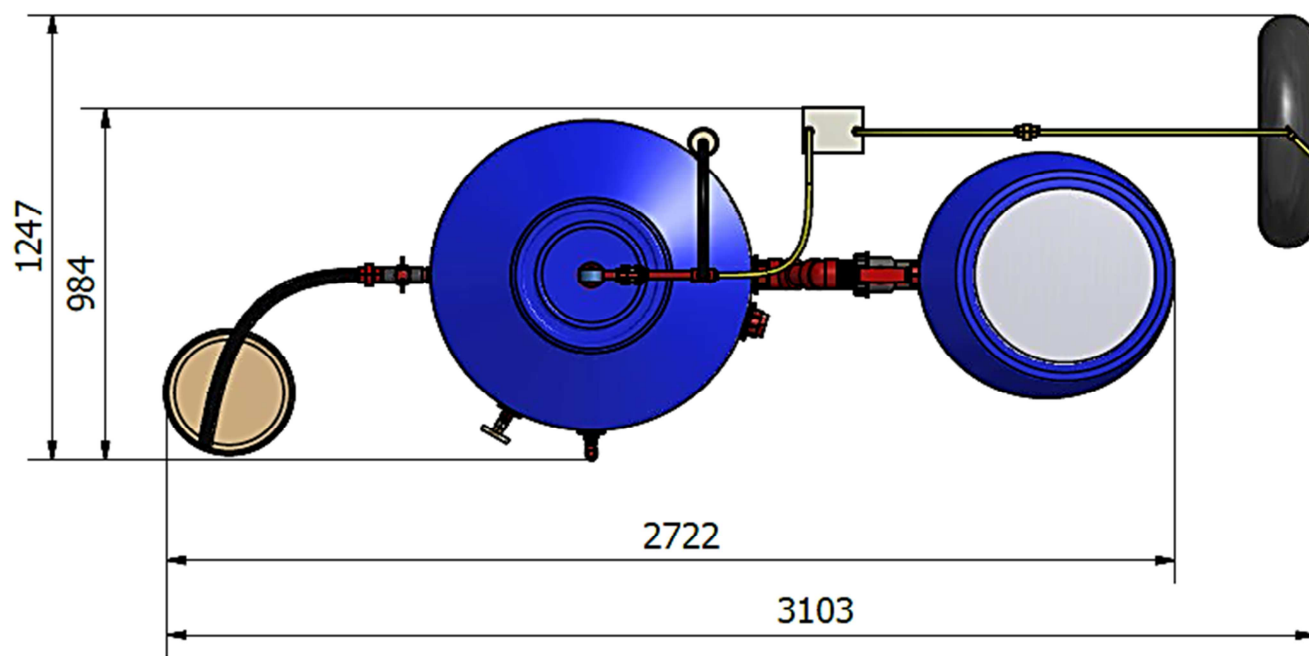
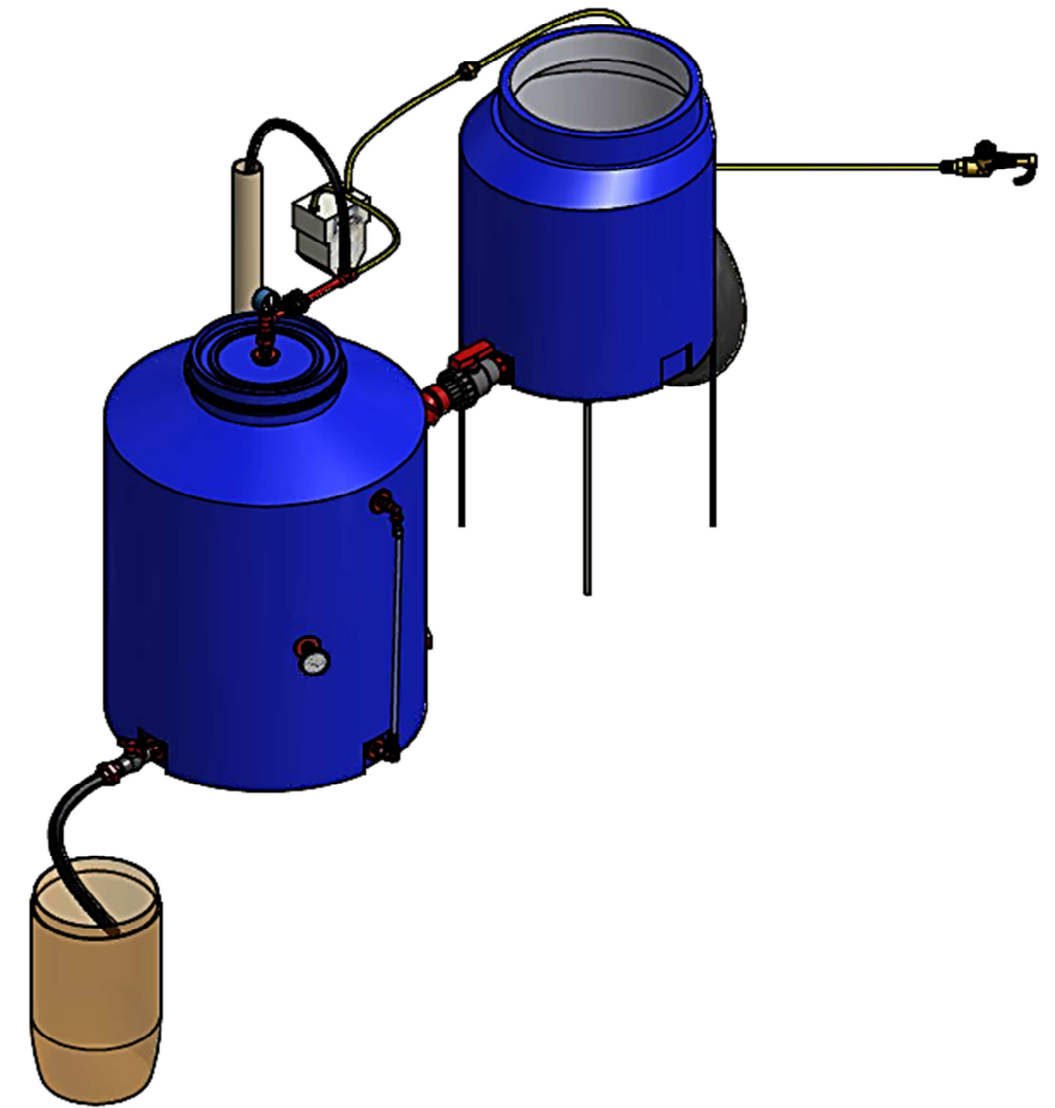
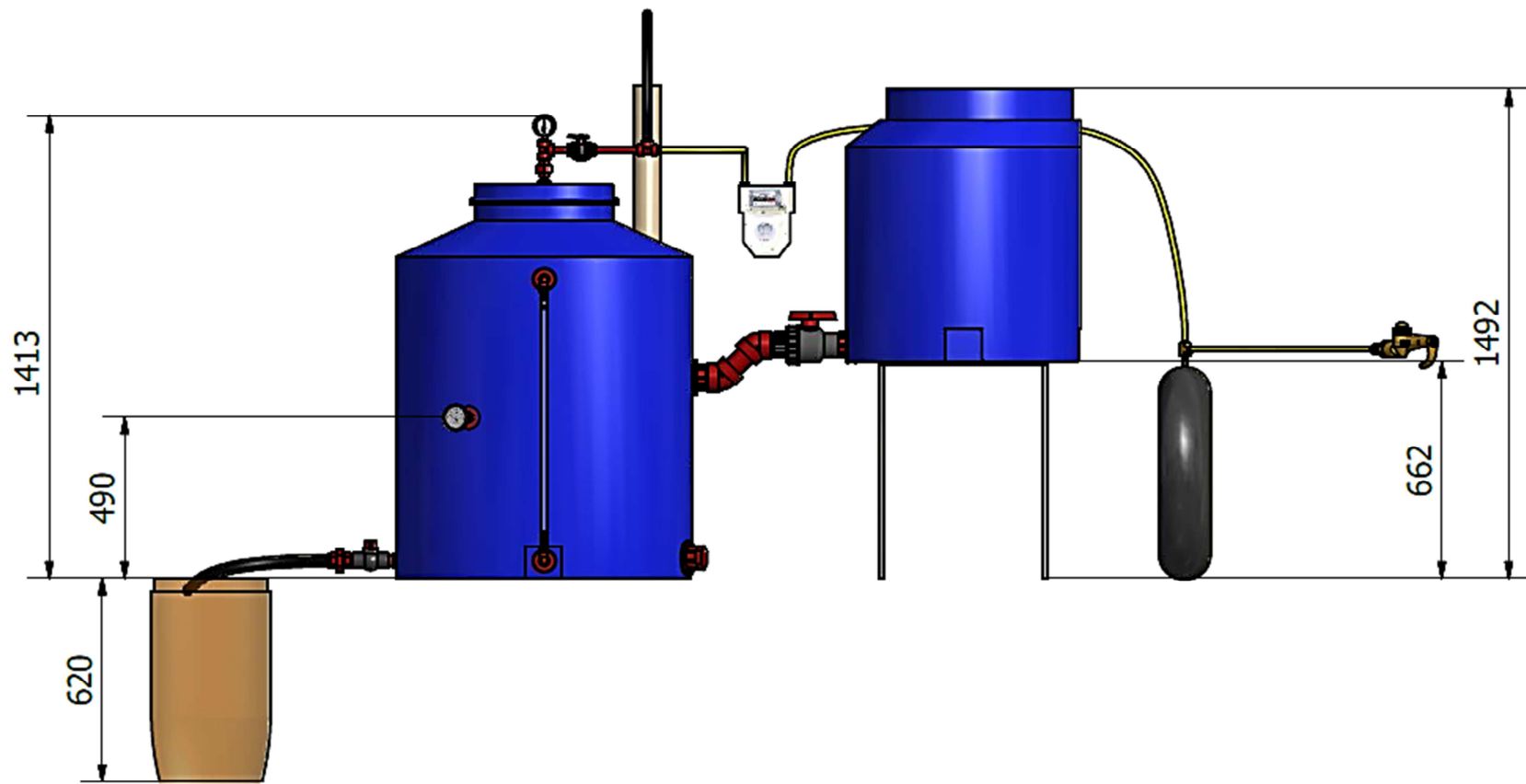
Nomenclatura válvulas	
Nomenclatura	Descripción
HA-101	Vál. bola alimentación
HA-102	Vál. bola biogás
HA-104	Vál. check almacen. biogás
HA-105	Vál. bola descarga (biol)
HA-106	Vál. bola estufa

Nomenclatura Instrumentación	
Nomenclatura	Descripción
PI-1	Manómetro
LI-1	Nivel
TI-1	Termómetro
PSV-1	Alivio de presión
FI-1	Gasómetro (flujo)

Nomenclatura tubería	
Nomenclatura	Descripción
2"-PP-WW-1	Tub. alimentación
1/2"-PP-NG-2	Salida gas
1/4"-HOSE-NG-3	Conexión gas
1"-PE-WW-4	Salida biol

TK-003
DESCARGA BIOL
.60 LTS.
AMB. @ AMB.

7.3. Anexo 3: Plano general



Diseñado por: A. Apolo	Revisado por: D. Escudero	Aprobado por: D. Almeida	Fecha creado: 15/05/15	Fecha aprobado: 20/05/15	Escala: 1:20	Tolerancia: 0.1
REGISTRO INGENIERIA	 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO		Título Documento: Ensamble general			
Materiales HDPE, PP, PVC, PE, Acero Inox, Latón, EPDM			ID Material: EnsambleReal	Rev. 2	Plano No. 1 / 2	
Unidades mm						
Otros						

7.4. Anexo 4: Hoja técnica tanque Biofermentador de Plastigama

Tanque Biofermentación P.E.
LÍNEA AGRÍCOLA



Empaque de caucho.
 Que impide el paso y salida de aire.

Abrazadera metálica.
 Para un sellado hermético.

**Capacidad
600 Litros**

**Refuerzo
Estructural**

Tanques Biofermentador de Polietileno

PARA PRODUCIR BIOFERTILIZANTE Y MULTIPLICAR MICROORGANISMOS.

- 📦 Elaborados con materia virgen 100% pura.
- 🔒 Herméticos, tapa con empaque de caucho y abrazadera a presión.

- 👉 Livianos, menor peso por ser espumados.
- 🏠 Ideal para elaborar bioinsecticidas, biofungicidas, quelatos.

TUBOSISTEMAS

PLASTIGAMA

de AMANCO

Ventajas

- Para cualquier tipo de cultivo**
 Para hacerlo específico al cultivo se le agrega el elemento deficitario de la plantación.
- En base de esta norma general se pueden elaborar muchos tipos de biofertilizantes, que sustituyen los fertilizantes convencionales, reduciendo los costos de fertilización, mitigando el impacto ambiental eliminando la contaminación producida por los fertilizantes de síntesis.
- Hermético**
 Asegurado con una tapa a presión especialmente diseñada y abrazadera metálica que impide el ingreso de aire a su interior.
- Su color impide el paso de la luz**
 Evita la proliferación de microorganismos como algas, que impiden el correcto desarrollo del proceso de elaboración del biofertilizante. No se corroe, ni se oxida y no requieren de mantenimiento continuo.

Elaboración de Biofertilizante

- Tiempo de elaboración**
 Mínimo: 120 días (Ideal 180 días).

 Reactivación mensual, cada 30 días se abre el tanque, se revuelve y se agregan microorganismos.
 - Materiales para preparación**
 Estiércol, desechos vegetales verdes, agua y microorganismos eficientes autóctonos.
 - Recomendaciones**
 No olvide dejar un espacio de 20 cm. Mínimo entre el líquido y la tapa.
- El tanque biofermentador debe de tener una perforación en la parte superior de la tapa para realizar la siguiente instalación con los siguientes accesorios:
- Adaptador para tanque 3/4"
 - Codo roscable 3/4"
 - Neplo flex 3/4"
 - Manguera (Esta nunca debe salir del agua por ser un proceso anaeróbico).

REV. 2006-09-20

Información y ventas:

Guayaquil: Km 4,5 Vía Durán - Tambo • Telfs: 2802020 - 2805100 • Fax: 2808048 - 2805963

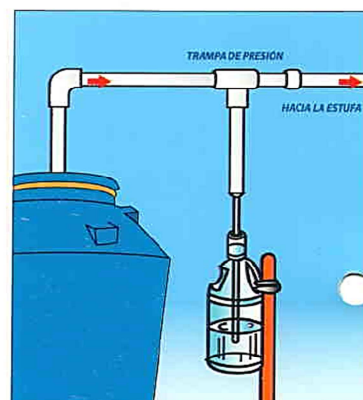
Quito: Calle de Los Molles N-4520 y de Las Higueras, Monteserrín • Pbx: 23340730

Especificaciones Técnicas

TANQUE BIOFERMENTADOR DE POLIETILENO



Capacidad			A	B	Ø
Nominal	Total	Útil			
	litros		mm	mm	mm
600	600	588	400	860	1,206



Cuidados Generales



No dejar que los tanques se almacenen en posición horizontal (acostado)



Ubicar los tanques sobre una superficie plana y libre de piedras



No arrastrar ni golpear el tanque.



Nº 1 de Latinoamérica
en Tubosistemas