



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

**ADECUACIÓN DE BIODIGESTOR ROTÓPLAS PARA LA
GENERACIÓN DE BIOGÁS**

TESIS

Que para obtener el título de

INGENIERO MECÁNICO

Presenta :

Daniel García Solache



**DIRECTOR DE TESIS: M. en I. DAVID FRANCO
MARTÍNEZ**

CIUDAD NEZAHUALCOYOTL, ESTADO DE MÉXICO

2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A ti Mamá:

Te dedico este trabajo por todo el apoyo y cariño que he recibido de vos. Por los innumerables esfuerzos y muestras de afecto que para conmigo has tenido.

Gracias, puesto que sin ti, esto nunca hubiese sido posible.

Confía en el tiempo, que suele dar dulces salidas a muchas amargas dificultades.

Mamá; Muchas, muchas Gracias.

Te quiero.

Para ti Papá:

Gracias, pues esto que soy ahora, es en gran medida a nuestros aciertos y desaciertos que como padre e hijo hemos tenido.

Estate orgulloso de mis logros y siéntelos como tuyos, pues sólo son el reflejo de los esfuerzos que tu y mi Madre tuvieron conmigo.

A mi hermana, Brenda:

Gracias por ser mi alegría y confort en los tiempos malos y no tan malos, el los gratos y muy gratos.

Que la vida nos presente más y mejores momentos juntos.

Gracias por ser parte de mi como yo de ti.

A toda mi familia:

Muchas gracias por la infinidad de veces en las que me han dado fe de su afecto y apoyo.

Al M. en I. David Franco Martínez, por brindarme el apoyo y colaboración, necesarios e indispensables para el éxito en este proyecto. Muchas gracias.

Somos lo que hacemos para cambiar lo que somos.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	VII
CAPITULO I.BIOMASA.	2
1.1. Definición de biomasa.....	2
1.2. Clasificación.....	3
1.3. Fuentes de la biomasa.	4
1.4. Métodos de transformación de la biomasa en energía.	10
CAPITULO II.BIODIGESTIÓN.....	19
2.1. Proceso anaerobio.	19
2.1.1. Fases de la fermentación anaerobia.....	19
2.1.2. Parámetros condicionantes de la fermentación metánica.	21
2.1.2.1 Efectos de la temperatura.	21
2.1.2.2 Importancia del pH.....	23
2.1.2.3. Agitación/mezclado.....	26
2.1.2.4. Relación Carbono/Nitrógeno en la biomasa.....	26
2.1.2.5. Niveles de sólidos totales (S.T.).....	28
2.1.2.6. Valores límites en la fermentación metánica.....	28
2.1.2.7. Sólidos volátiles.	29
CAPITULO III.BIODIGESTORES.....	32
3.1. Componentes de Biodigestores anaerobios.....	32
3.1.1. Reactor.	32
3.1.2. Entrada del afluente.....	32
3.1.3. Salida del efluente.	32
3.1.4. Extracción de lodos.	33
3.1.5. Sistema de gas.	33
3.1.5.1. Cúpula de gas.	33
3.2. Clasificación de Biodigestores.	33
3.2.1. Biodigestor de carga discontinua.	34
3.2.2. Biodigestor de carga semi-continua.	36
3.2.3. Biodigestor de carga continua.....	39
3.3. Biogás.....	39
3.3.1Características y componentes del biogás.	39

CAPITULO IV.DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y BASES DE DISEÑO.....	42
4.1. Biodigestor <i>Rotoplas</i> (tanque IMHOFF).....	42
4.1.1. Especificaciones técnicas y componentes.	44
4.2. Adecuación de tanque para aprovechamiento de biogás.....	46
4.2.1. Entrada del afluente.....	47
4.2.2. Salida del efluente.	47
4.2.3. Extracción de lodos.	48
4.2.4. Mecanismo de mezclado.	48
4.2.5. Sistema de gas.	48
4.3. Capacidad de biodigestor.	50
4.3.1. Tiempo de retención.....	53
4.3.2. Cálculo de carga hidráulica.	54
4.4. %sólidos totales.....	54
4.4.1. Sólidos totales al 10 %.	56
4.4.2. 10%ST para carga hidráulica (carga diaria).	58
4.5. Tamaño de lote.....	60
4.6. Relación carbono nitrógeno.	63
4.7. Control de pH.....	64
4.7.1. Disolución reguladora de pH.....	65
4.7.1.1. Ecuación de Henderson-Hasselbach.	65
4.8. Mezclado.....	75
4.8.1. Mezclado por hélice.	75
4.9. Presión de trabajo.....	79
4.10. Problemas de adecuación en biodigestor <i>Rotoplas</i>	83
CAPITULO V.ETAPA DE ARRANQUE Y OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR....	85
5.1. Pruebas previas al arranque.....	85
5.1.1. Prueba hidráulica.....	85
5.1.2. Prueba neumática.	85
5.2. Etapa de arranque.....	86
5.2.1. Segunda puesta en marcha.	88
5.3. Operacion diaria y problemas de funcionamiento en el biodigestor.	90

CAPITULO VI.RESULTADOS.	93
6.1. Evaluación de las temperaturas durante la biodigestión.	93
6.2. Evaluación del pH.	95
6.3. Estimación de biogás producido.	96
6.4. Estimación del poder calorífico del biogás.	97
CONCLUSIONES.	102
BIBLIOGRAFÍA.	105
ANEXOS.	107

ÍNDICE DE FIGURAS.

CAPITULO I.

Figura 1. 1: Generación de residuos sólidos urbanos	8
Figura 1. 2: Composición de los residuos sólidos urbanos.	9

CAPITULO II.

Figura 2. 1: Fases de la fermentación metánica.....	21
Figura 2. 2 : Efecto de la temperatura en la digestión anaerobia.....	22
Figura 2. 3: Escala pH.	25

CAPITULO III.

Figura 3. 1: Tipos de Biodigestores según su frecuencia de carga.....	34
Figura 3. 2: Biodigestor tipo Batch	36
Figura 3. 3: Biodigestor de cúpula móvil.	37
Figura 3. 4: Biodigestor de cúpula fija.	38
Figura 3. 5: Biodigestor tubular.....	38

CAPITULO IV.

Figura 4. 1:Funcionamiento de biodigestor Rotoplas.....	42
Figura 4. 2: Diagrama de tanque IMHOFF.	43
Figura 4. 3: Esquema técnico de biodigestor Rotoplas.	45
Figura 4. 4: Componentes de biodigestor Rotoplas.....	46
Figura 4. 5: Partes principales en biodigestor.	49
Figura 4. 6: salida de gas en el biodigestor.	50
Figura 4. 7: Volumen de trabajo de digestión.	53
Figura 4. 8: Crecimiento bacteriano.	67
Figura 4. 9: Flujo axial en reactor por hélice.....	75
Figura 4. 10: Biodigestor y sus componentes mezcladores.....	78
Figura 4. 11: Sistema biodigestor-gasómetro.	79
Figura 4. 12: Funcionamiento del gasómetro.	81

CAPITULO V.

CAPITULO VI.

Figura 6. 1. Temperatura ambiente durante la biodigestión	94
Figura 6. 2. Temperaturas interna y externa del biodigestor.	95
Figura 6. 3. Monitoreo de pH.	96
Figura 6. 4. Gasómetro.	97
Figura 6. 5. Quema de biogás.	99

ANEXOS.

Figura A. 1. Llenado para prueba hidráulica.	108
Figura A. 2. Estado de las válvulas para prueba neumática.	109
Figura A. 3. Insuficiencia de líquido.	111
Figura A. 4. Primer paso en la eliminación de oxígeno y CO ₂ . Estado normal para captación de biogás.	112
Figura A. 5. Purga de los gases generados, así como para la quema de biogás.	112
Figura A. 6. Esquema de carga diaria.	114

ÍNDICE DE TABLAS

CAPITULO I.

Tabla 1. 1: Estado físico de la biomasa en función del origen del recurso.	10
Tabla 1. 2: Potencial energético del biogás a partir de diferentes sustratos.	12

CAPITULO II.

Tabla 2. 1: fermentación ácida y alcalina.	20
Tabla 2. 2 : tiempo de retención según la temperatura.	23
Tabla 2. 3: pH y contenido salino.....	25
Tabla 2. 4 :Valores aproximados de la relación C/N de algunos residuos	27
Tabla 2. 5 :Valores limites en la fermentación.....	29
Tabla 2. 6: Velocidad de carga.	30

CAPITULO III.

Tabla 3. 1: Características del biogás.	40
--	----

CAPITULO IV.

Tabla 4. 1: Especificaciones técnicas.	44
Tabla 4. 2: Pruebas para obtención de S.T. en residuos sólidos urbanos.	55
Tabla 4. 3: Porcentaje de sólidos totales en residuos sólidos urbanos.	55
Tabla 4. 4: Ficha técnica de una hélice.....	76

CAPITULO V.

CAPITULO VI.

INTRODUCCIÓN.

Debido a que en los últimos años las concentraciones de contaminantes, derivados de la quema de combustibles tradicionales (leña), se han elevado alarmantemente, y que, por otra parte, millones de toneladas de desechos orgánicos son generados y dispuestos en rellenos sanitarios, la tendencia actual es plantear soluciones amigables con el medio ambiente, y por ello es de suma importancia, analizar la viabilidad que tienen los biodigestores domésticos o de pequeña escala, como es el caso del biodigestor Rotoplas, al ser estos acondicionados para que trabajen de manera anaerobia, para la generación de biogás, mediante la utilización de desechos orgánicos provenientes de los hogares. De tal manera que se pueda dar una solución efectiva a los problemas sanitarios y de contaminación del aire, así como una mayor calidad de vida. Para la realización de este proyecto se abordó una metodología de cálculo, diseño y construcción de un biodigestor que emplee los residuos ya mencionados.

En este punto, cabe mencionar que hasta el día de hoy, una gran parte de la población mundial utiliza leña para cocinar y calentar el hogar. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura conocida como FAO por sus siglas en inglés, menciona que casi la décima parte del total actual de la demanda humana de energía es perteneciente a la biomasa combustible tradicional (leña). Mientras que la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que aproximadamente la mitad de la población mundial queman leña, estiércol, carbón y otros combustibles tradicionales dentro de sus hogares, para preparar alimentos, calentar agua y para calefacción.

Según el CONEVAL (Consejo Nacional de la Evaluación de la Política de Desarrollo Social), de 2010 a 2012 la población en situación de pobreza en México alcanzó un porcentaje de casi el 46 por ciento. Donde, la leña, el carbón vegetal y otros combustibles sólidos se queman a menudo en fogones abiertos o estufas de mal funcionamiento, las cuales producen importantes concentraciones de contaminantes en el interior de las casas, que gradualmente pueden alcanzar niveles de 10 a 100 veces superiores a los recomendados por OMS.

La OMS menciona que, la exposición a estos contaminantes es probablemente mayor que la causada por el uso mundial de combustibles fósiles, y alcanza su mayor intensidad entre las mujeres y los niños pobres de los países en desarrollo, tanto en zonas rurales como urbanas, ya que estos sectores de la población son los que más suelen estar presentes mientras se cocinan los alimentos.

Algunos de los problemas para la salud detectados por la inhalación de los contaminantes derivados por la combustión de la biomasa son los siguientes:

- Infecciones agudas de las vías respiratorias (pulmonía) en niños pequeños, la cual es la principal causa de mortalidad infantil en todo el mundo.
- Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas, como bronquitis crónica y enfisema, en personas adultas que durante muchos años han cocinado con combustibles sólidos.

La condición de pobreza tiene condenada a la mitad de la población del planeta a depender de métodos de generación de energía doméstica contaminantes, donde la mayor parte de la población destina más del 10% de sus ingresos a pagar las facturas de energía. Esta realidad muestra cómo gran parte de la población del mundo no tiene acceso a recursos de combustión menos contaminantes.

Por otra parte, millones de toneladas de desechos orgánicos biodegradables son generados cada año por los sectores agropecuarios, municipales e industriales en todo el mundo, de los cuales un gran porcentaje son finalmente dispuestos en rellenos sanitarios.

En 2011 en México, se generaron alrededor de 41 millones de toneladas, lo que equivale a cerca de 112.5 mil toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU) diariamente. Donde la generación diaria de RSU por habitante es de 990 gramos aproximadamente, de los cuales el 52.4% pertenece a residuos sólidos orgánicos.

De tal forma que, como respuesta a los problemas de salud por la quema de biomasa convencional en los hogares en condiciones de pobreza, así como los problemas provenientes del mal manejo de los RSU, que tienen también un efecto negativo en la salud humana y de los cuales se producen gases como el metano, que al no contar con una alternativa de uso, es arrojado a la atmósfera, contribuyendo en gran medida en la concentración de gases de efecto invernadero; Se propone que la basura orgánica sea un remedio a estas problemáticas, puesto que esta, al descomponerse en condiciones anaerobias produce biogás, el cual está compuesto principalmente de metano (CH₄) en un 55-70%, dióxido de carbono (CO₂) en un 27-44%.

En tal caso, la investigación se centraría en la adecuación de contenedores de agua para la generación de biogás, en específico el biodigestor de marca *Rotoplas*, el cual es utilizado para almacenar aguas residuales, sustituyendo a las fosas sépticas comunes. Con lo que se esperaría que este fuese un parte aguas para la introducción de sistemas anaerobios en los hogares, para cubrir las necesidades domésticas, así como la disminución de los residuos que en esta misma se producen diariamente.

El implementar las adecuaciones correspondientes, así como el seguimiento diario del sistema, y sus anomalías y aciertos en la producción del biogás, podrían ser un paso más para el acercamiento de esta tecnología a la sociedad.

En el capítulo uno de este trabajo se trata de dar un panorama general de lo que es la biomasa, así como los diferentes tipos de procesamiento de esta, tratando de encaminar la investigación hacia el proceso anaerobio, causante de la generación de biogás.

El capítulo dos detalla lo que es el proceso anaerobio, así como algunos factores básicos concernientes a este proceso, sin los cuales la producción de biogás sería inhibida.

Dado que el proceso de biodigestión anaerobia es desarrollado en los Biodigestores (tecnología para generar biogás a partir de biomasa), el capítulo tres detalla los componentes de este, así como la clasificación de estos, según su forma de operación y frecuencia de carga la cual es una de las clasificaciones más comunes.

El capítulo cuatro muestra la información técnica del biodigestor Rotoplas, así como su adecuación para generar biogás, tomando en cuenta las adaptaciones físicas a este reactor, así como la memoria de cálculo referente al proceso anaerobio, para que con ello se asegure un funcionamiento lo más óptimo posible.

Ya que el propósito de este trabajo es la generación de biogás mediante las adaptaciones necesarias al digestor Rotoplas, se debe de plantear alguna forma de uso u operación de esta tecnología una vez realizada dichas adecuaciones; es por ello que en el capítulo cinco se realiza el proceso mediante el cual se debe poner en marcha el biodigestor, así como las pruebas necesarias para su óptimo desarrollo.

El capítulo seis expone los resultados obtenidos a partir del seguimiento diario que se le dio al biodigestor, haciendo una comparación de los valores teóricos con los valores obtenidos experimentalmente, esto con el objetivo de dar un panorama general de la viabilidad que representa el uso de esta tecnología.

Finalmente, se presentan las conclusiones en términos de la viabilidad que el biodigestor Rotoplas tiene al ser modificado y un anexo con un manual de usuario para el manejo del reactor.

CAPITULO I

ANTECEDENTES

I. BIOMASA.

La forma más antigua de aprovechamiento de la energía solar, inventada por la naturaleza misma, es la fotosíntesis. Mediante este mecanismo las plantas elaboran su propio alimento (su fuente de energía) y por ende las de otros seres vivos en las cadenas alimenticias. A partir de la fotosíntesis puede utilizarse la energía solar para producir sustancias con alto contenido energético.

De esta manera, la biomasa es una oportunidad para la humanidad de sustituir en parte la función que realizan los combustibles fósiles de proveernos de energía indispensable para el desarrollo y sustentabilidad humana, aprovechando los subproductos que no tienen valor para la cadena nutritiva o que no sirve para la fabricación de productos de mercado pero que pueden ser fuente de energía a través de transformaciones termoquímicas como la combustión, así como de transformaciones biológicas como la fermentación de azúcares en alcohol, etc.

1.1. Definición de biomasa.

Etimológicamente, biomasa es un término compuesto por el prefijo “bio” (del griego bios, vida) y "masa" (del latín massa, bulto o volumen), es decir, hace referencia a "masa biológica". La asignación de la Real Academia de la Lengua Española en su edición 22.^a del año 2012 define *biomasa* como "**1.** *Biol.* Materia total de los seres que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o de volumen. **2.** *Biol.* Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía".

Otra definición aceptada al hacer referencia a la biomasa como fuente de energía que propone La Asociación de Empresas de Energías Renovables la define como " La biomasa es la utilización de la materia orgánica como fuente energética. Por su amplia definición, la biomasa abarca un amplio conjunto de materias orgánicas que se caracteriza por su heterogeneidad, tanto por su origen como por su naturaleza".

Debido a la tan amplia gama de significados que se le asignan a la biomasa, su definición puede ser engorrosa y poco precisa e incluso demasiado amplia, por lo que nosotros utilizaremos la definición de biomasa dada por Nogués S. en su libro de energía de la biomasa, como: "*la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o*

provocado, utilizable como fuente de energía renovable, entendiéndose como tal que, por lo menos se consume a un ritmo inferior o igual al que se producen".

De este modo, la expresión biomasa hace referencia a toda materia orgánica proveniente de arboles, plantas y desechos animales que pueden ser convertidos en energía así como los provenientes de la agricultura y de los residuos urbanos. Ella está compuestas esencialmente de polímeros complejos de carbono, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno, de azufre en menores proporciones, así como de alimentos inorgánicos.

La biomasa como combustible se produce a partir de la energía contenida en la radiación solar que es captada y transformada en energía por medio de la fotosíntesis, el cual las plantas verdes y diversos microorganismos con pigmentos fotosintéticos llevan a cabo.

1.2. Clasificación.

Existen diversos criterios, consideraciones, apelativos para la clasificación de los diferentes tipos de biomasa, por ejemplo, puede basarse en las características del material, en su procedencia o en su uso final.

De manera que si observamos la forma de obtener la biomasa, se suele clasificar en *biomasa primaria y secundaria*. La primaria o directa, se trata de árboles y arbustos de los bosques, las plantas que crecen naturalmente. La biomasa secundaria también llamada residual o indirecta, es la obtenida como residuo o subproducto de una actividad humana.

Otra clasificación asiduamente utilizada, se basa en la manera o forma en que de ella se puede obtener energía, esta clasificación es singularmente útil, puesto que resulta muy intuitiva de cara a separar los procesos y tecnologías utilizadas para la obtención de energía:

- *Biocombustibles sólidos*, también llamada biomasa sólida. Las fuentes primarias son las extracciones de ecosistemas naturales directamente orientadas a energía y a los cultivos energéticos. Como principales fuentes secundarias se tienen los residuos de las operaciones silvícolas, los restos generados en la actividad agrícola, como las podas o la paja, y los residuos de industrias de procesamiento de la madera y de agroalimentarias. Todas ellas son fuentes en las que la materia orgánica se

encuentra en estado sólido, y de las que se puede extraer energía a través de procesos termoquímicos como la pirolisis, la gasificación o la combustión.

- *Biomasa residual húmeda*: es aquella con alto contenido de humedad y que por su procedencia y composición, permite que la materia orgánica sea fácilmente degradable mediante procesos bioquímicos. Se trata generalmente de líquidos. Las fuentes son, principalmente, los residuos ganaderos como los purines; los residuos urbanos, como la parte orgánica de las basuras o las aguas residuales; y por último, las aguas o flujos residuales con alta carga orgánica de empresas que procesan materia orgánica.
- *Biocarburantes*: aquellos combustibles líquidos con alto poder calorífico que pueden ser utilizadas en sistemas térmicos como los motores alternativos de combustión interna, quemadores o turbinas.

Los biocarburantes podrían denominarse *biomasa terciaria* puesto que no se obtienen directamente de un ecosistema natural. Más bien, es biomasa procesada, o transformada a partir de fuentes primarias y/o secundarias.

Cuando la biomasa original presenta un alto contenido en aceites, estos se extraen por procesos físicos (prensado) o fisico-químicos (extracción). Tanto estos aceites como su conversión química en biodiesel pueden emplearse como combustible para las ya mencionadas máquinas.

1.3. Fuentes de la biomasa.

Los recursos biomásicos incluyen cualquier fuente de materia orgánica, como los desechos agrícolas y forestales, plantas acuáticas, desechos animales y basura urbana. Su disponibilidad varía de región a región, de acuerdo con el clima, el tipo de suelo, la geografía, la densidad de la población, las actividades productivas, etc.

Por lo tanto, la biomasa constituye una forma de energía solar en la que la captación, conversión y almacenamiento de la energía se realizan a través de los procesos metabólicos de seres vivos. Las fuentes más importantes de biomasa son los campos forestales y agrícolas pues en ellos se producen residuos (rastros) que normalmente son dejados en el campo al consumirse sólo un bajo porcentaje de ellos con fines energéticos.

A efectos prácticos, la biomasa aprovechable puede ser la leña que resulta de las tareas de limpieza del monte, los residuos de la madera, el contenido orgánico de los residuos orgánicos y/o incluso los lodos de las depuradoras.

Por otro lado, los centros urbanos generan grandes cantidades de basura, compuestas en gran parte, por materia orgánica que puede ser convertida en energía, después de procesarla adecuadamente.

A) Cultivos agrícolas.

Los cultivos para la obtención de biomasa con fines energéticos consisten en plantaciones o siembras de especies con determinadas características, como son la rapidez de crecimiento y la capacidad de rebrote después de la corta, con el objeto de producir una mayor cantidad de biomasa por unidad de superficie y tiempo.

El empleo de granos de cultivos tradicionales de cereales (avena, trigo) no es rentable a nivel de explotaciones agrícolas para producir un combustible debido a su alto costo para la obtención del mismo, así como la competencia contra los costos relativamente bajos de los combustibles derivados del petróleo.

En lo que respecta a la producción de biocarburantes, las plantas utilizadas para la producción de etanol son la remolacha azucarera, el trigo el maíz, y la caña de azúcar, y para la producción de aceite son la colza, el girasol, la soja, la palma, y el cacahuate. Adicionalmente, este tipo de cultivos sirve para controlar la erosión y la degradación de los suelos. Una granja típica, usualmente genera uno o dos productos de mayor valor comercial como maíz, café, leche, o carne. El ingreso neto de ellos es, a menudo, vulnerable a las fluctuaciones del mercado, el aumento de los costos de insumos, a las variaciones climáticas y a otras fuentes.

B) Biomasa de residuos agroforestales.

Agricultura.

Se considera residuo al subproducto resultante de una actividad determinada y cuyo valor económico es escaso o nulo al no tener aprovechamiento comercial.

La biomasa residual agrícola se produce en los campos de cultivo como consecuencia de la actividad agrícola productiva. El residuo más abundante a nivel mundial es la paja de cereales. El arroz es el cereal con mayor producción mundial seguido cerca por el trigo y el maíz. La paja y cascarilla de arroz son con diferencia los residuos agrícolas más abundantes en el mundo.

Por otra parte, estos residuos abandonados en el lugar de producción ayudan a mantener los niveles de materia orgánica y minerales del suelo que, de otro modo, la acabarían, por ser agotado por las raíces.

Bosques.

La biomasa forestal residual se produce como consecuencia de las actividades que se llevan a cabo en los montes y que van desde la realización de trabajos silvícolas y/o de prevención de incendios, hasta la corta y aprovechamiento de la madera pasando por un gran número de otras actividades como lo son el desbroce para la obtención de pastizales, repoblaciones, ferrocarriles y carreteras, etc.

Al igual que la extracción de la biomasa agrícola, el retiro de biomasa forestal puede llegar a modificar el medio ambiente, si este no es extraído con suma atención, por ejemplo, con el fin de mantener la biodiversidad local (insectos, hongos, etc.) se toma a consideración el dejar hojas y ramas pequeñas, puesto que en ellas se concentran gran cantidad de nutrientes, así evitando la erosión del suelo.

C) Biomasa de residuos diversos.

La biomasa de los residuos se extiende a todas las formas de residuos derivados de la industria, las comunidades locales, o incluso de la agricultura, como el follaje de las plantas o de la remolacha. Asimismo, a veces también se incluyen la paja de los cereales y los tallos de los girasoles que producen: pero como son los mismos materiales agrícolas que producen granos y paja, parece más lógico considerarlos como subproductos agrícolas.

D) Lodos de depuradoras.

El tratamiento de las aguas residuales de las ciudades se produce en las estaciones depuradoras de aguas residuales con niveles de tratamiento más o menos elaborados, en

función de la cantidad de materia recibida para su eliminación y la calidad del vertido acuoso que se desea obtener a la salida. Estos métodos de tratamientos de aguas residuales, producen diferentes calidades de los lodos y en su mayoría tienen un alto contenido de materia biomásica, lo que los hace muy útiles para la generación de energía por diferentes procesos.

E) Licores negros.

El licor negro constituye el residuo separado de la pulpa (fibras de celulosa donde se ha separado la *lignina*) utilizada en la producción del papel.

En la actualidad, las industrias papeleras no vierten licores negros y el único residuo de biomasa disponible se limita a las cortezas que no siempre son quemadas. Sin embargo, en caso de fuerte limitación de CO₂ esta fuente de energía local podría ser sustituida por otras fuentes de energía y pasar a estar disponible para la producción de biocarburantes.

F) Residuos de industrias agroalimentarias.

Las industrias alimentarias producen desechos que no se pueden almacenar a largo plazo al aire libre, por lo que deben ser tratadas rápidamente como los residuos domésticos. Estos residuos son producidos en los centros de producción y no están dispersos como los residuos forestales. Su uso para producir biocombustibles constituye un tratamiento de residuos que podría ser financiado en parte por el productor de los residuos. Mientras tanto, los principales métodos de eliminación son la alimentación del ganado y su aplicación a tierras agrícolas, que es más barato que la incineración o su transporte a vertederos controlados.

G) Residuos fermentables de origen domestico.

Según la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en su doceavo informe sobre residuos, denomina a los residuos sólidos urbanos (RSU) como "los que se generan en las casas habitación como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas (los productos de consumo y sus envases, embalajes o empaques) o los que provienen también de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de los establecimientos o en la vía pública, con características

domiciliarias, y los resultantes de las vías y lugares públicos siempre que no sean considerados como residuos de otra índole (DOF, 2003)."

En este informe cabe destacar la gran cantidad de RSU generada diariamente, que son calculadas por la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol). Según dicha dependencia, en 2011 se generaron alrededor de 41 millones de toneladas, lo que equivale a cerca de 112.5 mil toneladas de RSU diariamente.

La generación total de RSU en el país difiere de manera importante a nivel geográfico. Si se considera la regionalización de la Sedesol para el análisis de la generación de residuos, en 2011 la región Centro contribuyó con el 51% de la generación total en el país, seguida por la región Frontera Norte (16%) y el Distrito Federal (12%). Como lo muestra la figura 1.1.

Generación de RSU por región, 2011

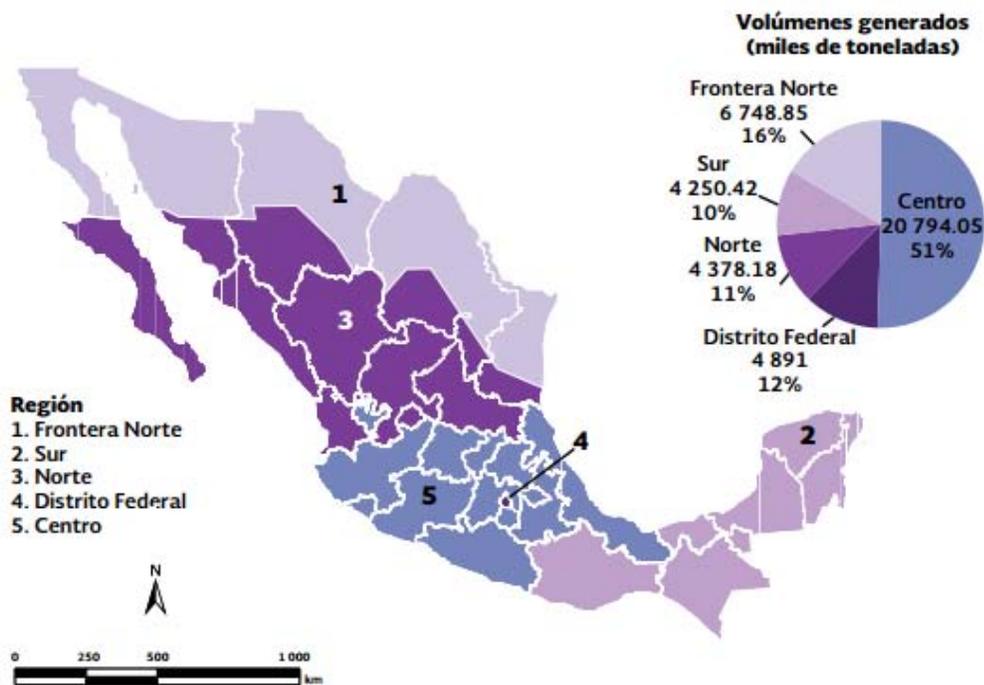


Figura 1. 1: Generación de residuos sólidos urbanos

Fuente: Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas urbano-marginadas, Sedesol. México. 2012.

Como tal la generación de RSU por habitante, se observa que ha aumentado significativamente en el tiempo: entre 1950 y 2011, el volumen de generación diario aumentó más de tres veces, pasando de 300 a 990 gramos en promedio. Si se evalúa anualmente, la generación por habitante pasó de 306 a 360 kilogramos entre 1997 y 2011, es decir, se incrementó en promedio 3.9 kilogramos por año.

En cuanto a su composición, los RSU también han cambiado de manera importante en las últimas décadas en el país. En general, la composición depende, entre otros factores, de los patrones de consumo de la población: países con menores ingresos producen menos residuos, dentro de los cuáles dominan los de composición orgánica, mientras que en los países con mayores ingresos, los residuos son mayormente inorgánicos a partir de productos manufacturados y con un porcentaje mayor de productos y desechos. Según la Sedesol el caso de México ilustra la transformación entre ambos tipos de economías: "en la década de los 50, el porcentaje de residuos orgánicos en la basura oscilaba entre 65 y 70% de su volumen, mientras que para 2011 esta cifra se redujo al 52.4%.". Figura 1.2.

Composición de los RSU en México, 2011



Figura 1. 2: Composición de los residuos sólidos urbanos.

Fuente: Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas urbano-marginadas, Sedesol. México. 2012.

Cabe señalar que ese 52.4% de desperdicios orgánicos son en su mayoría fermentables, por lo que resulta idóneo para la producción de biogás y/o biocarburantes, proporcionando a la sociedad de un nuevo recurso que normalmente carecería de valor.

1.4. Métodos de transformación de la biomasa en energía.

La biomasa o recursos biomásicos se presentan en diferentes estados físicos que determinan la factibilidad técnica y económica de los procesos de conversión energética que se pueden aplicar según el tipo de la biomasa.

Por ejemplo, los desechos forestales indican el uso de los procesos de combustión directa o procesos termo-químicos; los residuos animales indican el uso de procesos anaeróbicos (bioquímicos).

El estado físico de la biomasa se puede clasificar según el tipo de recurso, indicado en la siguiente tabla:

Tabla 1. 1: Estado físico de la biomasa en función del origen del recurso.

Recursos de biomasa	Tipo de residuo	Características físicas (HR= Humedad Relativa)
Residuos forestales	Residuos de aserrío: corteza, aserrín, astillas. Residuos de ebanistería: corteza, aserrín astillas Residuos de plantaciones: corteza, aserrín, astillas	Polvo sólido HR>50% Polvo sólido HR del 30 al 45% Polvo sólido HR<55%
Residuos agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales Cáscara y polvo de granos secos (arroz, café) Estiércol Residuos de cosecha: tallos, hojas, maleza, pasto	Sólido, alta HR Polvo, HR<25% Sólido, alta HR Sólido HR>55%
Residuos industriales	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales Residuos de procesamiento de carne Aguas de lavado y precocido de carnes y vegetales Grasas y aceites vegetales	Sólido, alta HR Sólido, alta HR Líquido Líquido, grasoso
Residuos urbanos	Aguas negras Desechos domésticos orgánicos Basura inorgánica	Líquido Sólido, alta HR Sólido, alta HR

Fuente: “energía de la biomasa”, Nogués Fernando.

Por otro lado las características tanto físicas como químicas también afectan al proceso de conversión de la biomasa en energía, como lo pueden ser:

- Composición química y física: las características químicas y físicas de la biomasa determinan que tipo de combustible o subproducto se puede generar; por ejemplo, los desechos animales producen altas cantidades de metano, mientras que la madera produce *gas pobre*, que es una mezcla rica en monóxido de carbono (CO).

- Contenido de humedad (Humedad Relativa):

El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca.

- Poder calorífico: el contenido calorífico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa. Su poder calorífico está relacionado directamente con su contenido de humedad.
- Densidad aparente: esta se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta.
- Relación, transporte y manejo: las condiciones para la recolección, el transporte y el manejo en planta de la biomasa, son factores que afectan los costos de inversión y operación en todo su proceso.

Generalmente, el contenido energético de la biomasa se mide en función del poder calorífico del recurso, aunque para algunos de ellos, como es el caso de la biomasa residual húmeda o de los biocarburantes, se determina en función del poder calorífico del producto obtenido en su tratamiento.

En la siguiente tabla se muestra el potencial energético medio del biogás obtenido en la digestión anaerobia de algunos recursos:

Tabla 1. 2: Potencial energético del biogás a partir de diferentes sustratos.

sustrato	Cantidad de gas a 30°C	Contenido en metano	P.C.I.
	l/Kg de residual seco	(%)	Kj/m ³ de biogás
Estiércol con paja	286	75	25.498
Excremento de vaca	237	80	27.170
Excremento de cerdo	257	81	27.588
Aguas residuales urbanas	100 (por m ³ de agua tratada)	65	22.154

Fuente. “energía de la biomasa”, Nogués Fernando.

En este caso su Poder Calorífico Inferior (P.C.I.) se encuentra dado en función del que posee el biogás generado en su digestión anaerobia.

A) Combustión.

La combustión se trata del proceso termoquímico más conocido. Se entiende por combustión la reacción química por la cual un material, el combustible, a partir de una temperatura determinada, se combina con oxígeno, el comburente, para dar lugar a dos tipos de productos: los gaseosos, denominados humos o gases de combustión, y los sólidos, las cenizas, que están formadas por componentes no combustibles y por aquellos del combustible que no hubiesen sido totalmente quemados en el proceso, los inquemados.

Hoy en día la combustión se utiliza para la generación de calor (calefacción, calor para procesos industriales, secado, etc.). O la generación eléctrica calentando un fluido de trabajo en una caldera y expandiendo el vapor generado en turbinas de vapor (ciclo Rankin).

Según la composición elemental del combustible se demanda una cantidad de oxígeno para completar la combustión. A esta cantidad exacta de oxígeno estequiométrico, necesaria para cumplir la estequiometría de la combustión que se puede hallar a partir de las reacciones de oxidación de los elementos que componen a la biomasa: C, O, N, H, S.

El exceso de aire es la diferencia entre el aire realmente introducido en la cámara de combustión y el aire estequiométrico (teóricamente necesario para la combustión). En los

procesos reales de combustión el exceso de aire es un parámetro muy importante puesto que la realización de una combustión con el aire estequiométrico conlleva la generación de inquemados.

B) Pirolisis.

Se puede definir pirolisis como la descomposición de la materia orgánica por medio de la aportación de energía en forma de calor en una atmosfera inerte o en el vacío. Esta reacción lleva a la producción de un residuo carbonoso, gases condensables y productos gaseosos.

En función del modo de cómo se realice la pirolisis y del tipo concreto de biocombustibles, las fracciones de los productos obtenidos son diferentes. El objetivo a conseguir de la pirolisis es la obtención de fracciones sólidas, líquidas y/o gaseosas a partir de la biomasa, con el fin de utilizarlas en la generación termoeléctrica o bien de aprovechar su alto valor añadido en el mercado. Actualmente uno de los principales intereses de la pirolisis es la producción de aceites piroleñosos que reformado y refinados tengan propiedades similares a la gasolina y el gasoil. Estos procesos permiten el paso de biomasa sólida seca a biocarburantes de segunda generación.

C) Gasificación.

Es un proceso termoquímico en el que la materia carbonada es transformada en un gas combustible con poder calorífico, mediante una serie de reacciones que ocurren debido a altas temperaturas en presencia de un agente gasificante.

Tras el calentamiento inicial, las fracciones orgánicas ligeras se escapan de la materia sólida y se combinan gracias a las altas temperaturas locales, con el agente gasificante, es decir, con los agentes reactivos introducidos en las zonas donde se prevé tengan lugar las reacciones de la gasificación.

Existe una gran variedad de agentes gasificantes, como por ejemplo: hidrogeno, vapor de agua, oxígeno o aire. Los gases producidos con cada uno de ellos difieren, en su composición final y en sus propiedades como combustible.

El aire es un agente gasificante muy utilizado actualmente debido a que es un fluido abundante y barato. En la gasificación con aire este se introduce en defecto, el necesario

para una combustión completa. De esta manera se produce una combustión parcial local en el seno del material que permite calentarlo. Los gases desvolatilizados restantes a alta temperatura, y en ausencia de oxígeno, experimentan reacciones químicas para la formación de compuestos ya sean inertes (CO_2) o combustibles (CO , CH_4 , H_2).

D) Fermentación alcohólica.

La fermentación alcohólica, también conocida como, fermentación etílica, o del etanol, es un proceso de tipo biológico, en el cual se lleva a cabo una fermentación sin presencia de oxígeno. Este tipo de fermentación se debe a las actividades de ciertos microorganismos, los cuales se encargan de procesar azúcares, como la glucosa, la fructosa, etc. Numerosos hongos, bacterias, algas y algunos protozoos, fermentan azúcares, transformándolos en etanol y CO_2 . Este es el proceso que se conoce como fermentación alcohólica.

La fermentación alcohólica, al igual que otro tipo de fermentaciones, como es el caso de la fermentación láctica, es de gran utilidad para el hombre, pues por ejemplo, la fermentación alcohólica llevada a cabo por las levaduras, sirve para la fabricación de bebidas alcohólicas (como el vino o la cerveza), y el CO_2 procedente de la fermentación, es utilizado para hacer crecer el pan y otros alimentos.

La principal finalidad de una fermentación alcohólica, es la producción de energía de tipo anaeróbica (con ausencia de oxígeno) para microorganismos como las levaduras, en el caso de ver el proceso desde la perspectiva microbiana, pero si lo hacemos desde la perspectiva humana, el proceso es de tipo bioquímico, con la finalidad de producir etanol

Existen diferentes tipos de fermentaciones alcohólicas, las cuales dividimos en dos grandes grupos, la fermentación industrial, y la fermentación natural. Además podemos hablar de fermentaciones específicas, las cuales son manipuladas para conseguir ciertas cantidades de etanol con la finalidad de realizar algunas bebidas. Dentro de este grupo destacamos la fermentación del vino, de la cerveza, del arroz, de la leche, etc.

Además de la utilización de los procesos fermentativos, con la finalidad de producir bebidas, u otros alimentos, la fermentación alcohólica hoy en día tiene usos diversos en la industria, donde forma parte de la producción de cosméticos, productos de limpieza, biocombustibles, pesticidas biológicos, etc.

E) Síntesis del metanol.

El metanol es un combustible con un gran poder calorífico, que arde con llama incolora o transparente y cuyo punto de inflamación es de 12,2 °C. Durante mucho tiempo fue usado como combustible de autos de carrera. Al ser considerado como inflamable de primera categoría, las condiciones de almacenamiento y transporte deberán ser extremas.

Originariamente se producía metanol por destilación destructiva de astillas de madera. Esta materia prima condujo a su nombre de alcohol de madera. Este proceso consiste en destilar la madera en ausencia de aire a unos 400 °C formándose gases combustibles (CO, C₂H₄, H₂), empleados en el calentamiento de las retortas; un destilado acuoso que se conoce como ácido piroleñoso y que contiene un 7-9% de ácido acético, 2-3% de metanol y un 0.5% de acetona; un alquitrán de madera, base para la preparación de antisépticos y desinfectantes; y carbón vegetal que queda como residuo en las retortas.

Actualmente, todo el metanol producido mundialmente se sintetiza mediante un proceso catalítico a partir de monóxido de carbono e hidrógeno. Esta reacción emplea altas temperaturas y presiones, y necesita reactores industriales grandes y complicados. La reacción se produce a una temperatura de 300-400 °C y a una presión de 200-300 atm. Los catalizadores usados son ZnO o Cr₂O₃. El gas de síntesis (CO + H₂) se puede obtener de distintas formas. Los distintos procesos productivos se diferencian entre sí precisamente por este hecho. Actualmente el proceso más ampliamente usado para la obtención del gas de síntesis es a partir de la combustión parcial del gas natural en presencia de vapor de agua.

Cabe destacar que este tipo de combustible puede ser favorable para la disminución del impacto ambiental, puesto que puede crearse a partir de residuos renovables tales como pasto, caña de azúcar, etc., y por ende menor contaminación ambiental que los combustibles fósiles.

F) Biodiésel.

El biodiésel se genera a partir de plantas oleaginosas como el cártamo, las semillas de soya, el girasol, la palma, de aceite de cocina usado o de grasas animales.

Dependiendo de su calidad, puede ser empleado directamente en motores diésel o combinado con diésel fósil para aumentar la lubricidad de éste último, ya que el biodiesel suele ser más denso.

Para generar biodiésel a partir de plantas, primero debe obtenerse el aceite contenido en sus semillas, ya sea por medio del prensado mecánico o mediante la extracción química empleando solventes.

En cambio, si se trata de aceite de cocina usado, debe someterse a una limpieza que remueva todos los sobrantes de alimento, calentándolo y colándolo. Si se trata de aceite a partir de grasa animal, también debe pasar por un proceso de limpieza y estabilización de su contenido de ácidos grasos libres.

Una vez que se tiene el aceite base limpio, se le somete al proceso principal, conocido como transesterificación, en el que se separan sus componentes para obtener biodiesel y glicerina. Este proceso se realiza mezclando el aceite con una pequeña parte de metanol y otra de algún catalizador base (como el hidróxido de sodio NaOH), mientras se calienta y se mueve. Al final de este proceso, la glicerina, que es más pesada, se va al fondo del contenedor, mientras que el diésel flota en la parte superior.

Para finalizar el proceso, el biodiesel es sometido a procesos de limpieza y refinación hasta que alcanza los estándares adecuados.

Actualmente es tal la cantidad de bióxido de carbono de origen fósil que agregamos a la atmósfera, que hemos generado un desbalance provocando lo que se conoce como calentamiento global.

En cambio, el bióxido de carbono contenido en los biocombustibles es el que capturaron los cultivos en su ciclo de vida, de tal forma que cuando quemamos el biocombustible le regresamos a la atmósfera una cantidad de bióxido de carbono que pertenece a su equilibrio y será vuelta a capturar por las plantas.

G) Fermentación metánica o metanización.

Los tratamientos biológicos de degradación de la biomasa y de sus desechos, se aplican a la materia orgánica biodegradable, denominada fermentable. La descomposición anaerobia de la materia orgánica produce un gas combustible. Este gas contiene una alta porción en metano (CH_4) al cual se le designa como biogás.

CAPITULO II

BIODIGESTIÓN

II.BIODIGESTIÓN.

La biodigestion es un proceso biológico de fermentación natural en el que una comunidad de bacterias cooperan para formar una fermentación estable, la cual se puede dar de dos formas: en presencia de oxígeno (biodigestión aerobia) y sin la presencia de oxígeno (biodigestión anaerobia).

2.1. Proceso anaerobio.

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos.

Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico.

2.1.1. Fases de la fermentación anaerobia.

La digestión es un proceso anaeróbico, en el que los materiales de descomposición pasan por varios procesos: la licuefacción, gasificación y mineralización, obteniéndose un producto final inerte con liberación de gases.

La licuefacción se produce por enzimas extracelulares que hidrolizan los carbohidratos complejos a simples azúcares, las proteínas a péptidos y los aminoácidos y grasas a glicerol y ácidos, siendo el producto final de la licuefacción, ácidos orgánicos volátiles.

Durante la gasificación, estos productos se convierten en gases, cuyos principales componentes son el metano y el dióxido de carbono.

La digestión pasa por distintas fases, siendo las principales la fermentación ácida y la fermentación alcalina o metánica. Ver tabla 2.1.

Tabla 2. 1: fermentación ácida y alcalina.

Fermentación ácida			
Fangos frescos Substrato complejo carbohidratos grasas proteínas	Microorganismos “A” principalmente formadores de ácidos	CO ₂ , H ₂ O Productos de degradación intermediaria	Ácidos orgánicos Productos celulares y otros de degradación intermediaria
Fermentación alcalina			
Fangos frescos Substrato complejo carbohidratos grasas proteínas	Microorganismos “B” Principalmente formadores de ácidos	CH ₄ + CO ₂ Productos de degradación intermediaria	Otros productos finales Productos celulares y otros de degradación intermediaria

Fuente. “depuración de aguas residuales”. Hernández Muñoz Aurelio.

Todo proceso digestivo anaeróbico se lleva a cabo por cuatro pasos esenciales, los cuales son la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y fermentación metánica. Figura 2.1.

- Hidrólisis. Solubiliza en compuestos más simples que pueden ser absorbidos por los microorganismos. Intervienen bacterias hidrolíticas, que rompen las moléculas de carbohidratos, lípidos, proteínas, etc... y producen ácidos grasos.
- Acidogénesis. Mediante la cual los monómeros obtenidos en la fase anterior, por la acción de determinadas bacterias, se convierten en alcoholes, ácidos orgánicos, gas carbónico e hidrogeno.
- Acetogénesis. La realizan las bacterias anaerobias que aseguran la transformación de los compuestos de la fase anterior en ácido acético, gas carbónico, hidrogeno y formiatos.
- Fermentación metánica. Esta fase se realiza gracias a la acción de bacterias de lento crecimiento (metanogénicas) que degradan los compuestos antes sintetizados y los transforman en gas metano y gas carbónico.

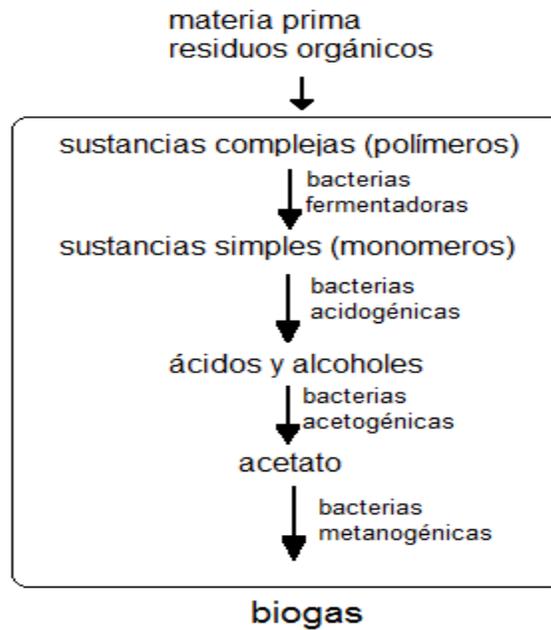


Figura 2. 1: Fases de la fermentación metánica.

Fuente: “Biotecnología”. Muñoz de Malajovich María.

2.1.2. Parámetros condicionantes de la fermentación metánica.

La digestión está influenciada por una serie de factores que determinan su eficacia:

- Temperatura
- pH
- mezcla del sustrato o biomasa
- mezclado
- relación carbono/nitrógeno
- sólidos totales .(ST)
- Sólidos volátiles. (SV)

2.1.2.1 Efectos de la temperatura.

El proceso de la digestión puede realizarse a grandes rasgos en dos rangos diferentes de temperatura, las mesofílicas comprendidas entre los 12°C y 35°C, optimizándose el proceso entre los 29°C y los 33°C. Los termofílicos trabajan entre los 37°C y los 65°C con un óptimo en las proximidades de los 55°C representados en la figura 2.2

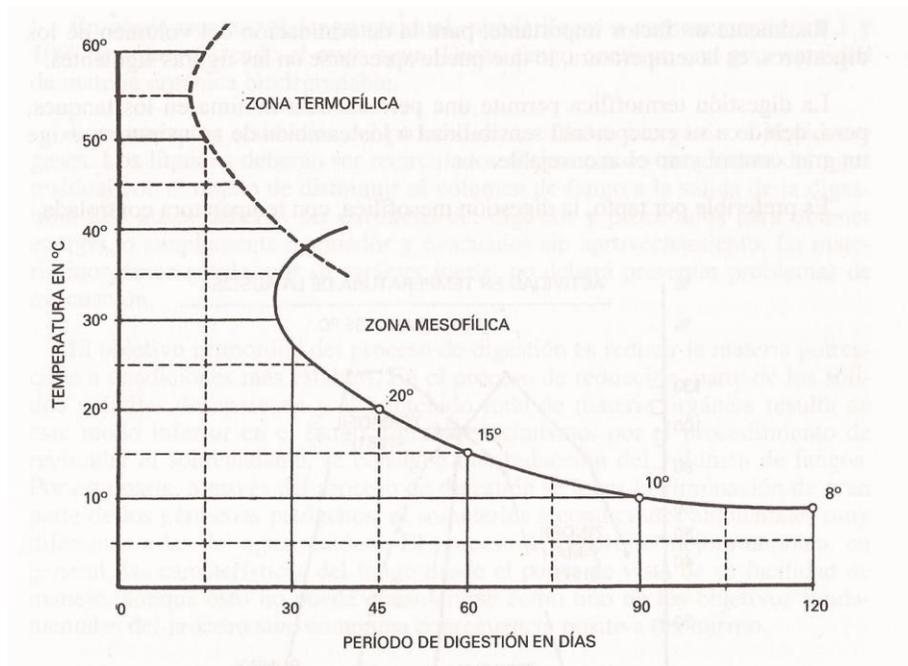


Figura 2. 2 : Efecto de la temperatura en la digestión anaerobia.

Fuente: “Depuración de aguas residuales” Hernández Muños Aurelio.

Con el aumento en el rango de temperatura se aumenta la tasa de hidrólisis, la velocidad de crecimiento de las bacterias y con ello la velocidad de producción de biogás.

Trabajando en el rango termofílico se asegura además, la destrucción de patógenos, de huevos y larvas de insectos, así como una permanencia mínima en los tanques, pero, debido a su excepcional sensibilidad a los cambios de temperatura, exige un gran control y no es aconsejable.

Es preferible por tanto la digestión mesofílica, con temperatura controlada.

En el proceso de digestión anaerobia son las bacterias metanogénicas las que producen, en la parte final del proceso, metano. Existen diferentes poblaciones de bacterias metanogénicas y cada una de ellas requiere una temperatura para trabajar de forma óptima. Existen poblaciones metanogénicas que tienen su mayor rendimiento a 70°C de temperatura, pero para ello habría que calentar el lodo interior del biodigestor. Hay otras poblaciones que tienen un rango óptimo de 30 a 35°C. Estas temperaturas se pueden alcanzar en zonas tropicales de manera natural. Ver tabla 2.2.

La actividad de las bacterias desciende si estamos por encima o por debajo del rango de temperaturas de trabajo.

A menores temperaturas se sigue produciendo biogás, pero de manera más lenta. A temperaturas inferiores a 5°C se puede decir que las bacterias quedan dormidas y ya no producen biogás.

Por ello es necesario estimar un tiempo de retención según la temperatura a la que se trabaje. El tiempo de retención es la duración del proceso de digestión anaerobia, es el tiempo que requieren las bacterias para digerir la biomasa o sustrato y producir biogás. Así a menores temperaturas se requiere un mayor tiempo de retención que será necesario para que las bacterias que tendrán menos actividad, tengan tiempo de digerir el sustrato y de producir biogás.

Tabla 2. 2 : tiempo de retención según la temperatura.

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

Fuente. “Biodigestores familiares”. Martí Herrero Jaime.

2.1.2.2 Importancia del pH.

En cada fase del proceso los microorganismos presentan máxima actividad en un rango de pH diferenciado, por lo que debe establecerse el equilibrio entre la producción de ácidos y su regresión, para que ambos tipos de organismos puedan coexistir y encuentren las posibilidades ambientales para su desarrollo.

Concretamente el proceso de digestión suele interrumpirse por el decaimiento de los organismos de metano debido a algún cambio ambiental que les hace menos viables. Esta es la razón de que el pH del sustrato ó biomasa en digestión sea indicio de que la digestión se está realizando en condiciones adecuadas.

Por debajo de pH 6.2 la supervivencia de los microorganismos productores de metano es imposible y, por consiguiente, cuando en un digestor se alcanza este pH, la digestión puede considerarse como interrumpida.

El control del pH determinará si los distintos procesos se realizan satisfactoriamente. La biomasa digerida tiene pH comprendido entre 7 y 8. La reacción alcalina constituye la base cierta de que el tratamiento es correcto.

Así, las bacterias formadoras de metano tienen un pH óptimo comprendido entre 6.8 y 7.4, admitiendo valores funcionales entre 6.8 y 7.8.

En algunas aguas residuales con bajo poder tampón puede llegar a ser necesario controlar exteriormente el pH. No es así para los residuos orgánicos complejos, como los ganaderos, para los cuales su alta alcalinidad permite una autorregulación permanente de pH.

Desde el punto de equilibrio ácido-base, puede representarse el líquido de suspensión de un fango digerido, como una solución acuosa de productos intermedios y terminales, que se obtiene en el curso de la digestión.

- Para un pH y una concentración dadas, existe una relación definida entre el ácido y la base.
- De la misma forma, para una CO_2 total dado, solamente existe una relación entre el ácido libre y el bicarbonato.
- Los ácidos acéticos, propiónico y butírico son ácidos de igual fuerza, ligeramente superior a la del ácido carbónico.

A pH 7, todo ácido volátil se encuentra en forma de sal.

Con pH comprendido entre 4.1 y 7, el equilibrio ácido-base se caracteriza por la presencia de bicarbonato, de ácido carbónico, de acetato, de ácido acético.

A $pH > 7$ se tiene ácido carbónico, bicarbonato y acetato. Ver figura 2.3.

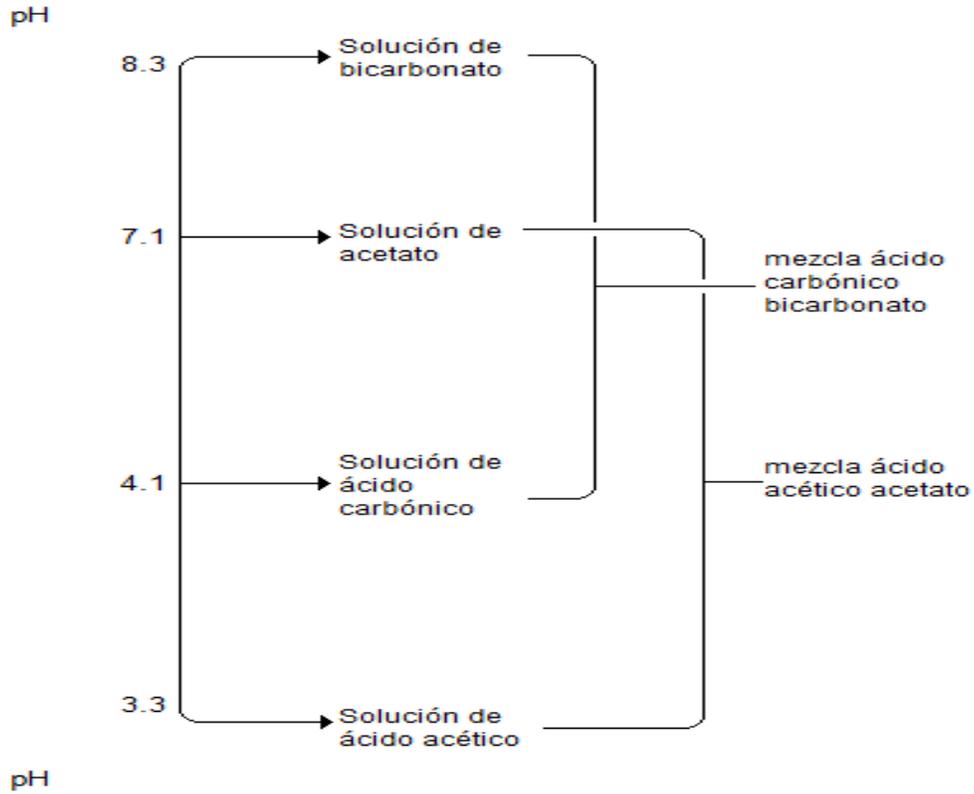


Figura 2. 3: Escala pH.

Fuente: “Depuración de aguas residuales” Hernández Muños Aurelio.

Tabla 2. 3: pH y contenido salino

Relación acetato-ácido acético		
pH	% de acetato en equilibrio	%de ácido acético
5	64,31	35,7
5.5	85,-	15,-
6	94,74	5,26
6.5	98,28	1,74
7	99,45	0,55

Fuente: “depuración de agua residuales” Hernández Muñoz Aurelio.

2.1.2.3. Agitación/mezclado.

Hay diferentes razones para mantener un cierto grado de agitación en el medio en digestión:

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

Con ello, se consigue reducir sustancialmente el tiempo de digestión.

2.1.2.4. Relación Carbono/Nitrógeno en la biomasa.

Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a fermentación anaeróbica. La calidad y la cantidad del biogás producido dependerán de la composición y la naturaleza del residuo utilizado. Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes.

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1

La descomposición de materiales con alto contenido de carbono, superior a 35:1, ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno, pero el período de producción de biogás es más prolongado. En cambio, con una relación C/N menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso.

En términos generales, se considera que una relación C/N óptima que debe tener el material “fresco” que se utilice para iniciar la digestión anaeróbica, es de 30 unidades de carbono

por una unidad de nitrógeno, es decir: $C/N = 30/1$. Por lo tanto, cuando no se tiene un residuo con una relación C/N inicial apropiada, es necesario realizar mezclas de materias en las proporciones adecuadas para obtener la relación C/N óptimas.

Sobre la base del contenido de carbono y de nitrógeno de cada una de las materias primas, puede calcularse la relación C/N de la mezcla mediante la siguiente fórmula:

$$k = \frac{C1Q1 + C2Q2 + \dots + CnQn}{N1Q1 + N2Q2 + \dots + NnQn}$$

$K = C/N$ de la mezcla de materias primas.

$C = \%$ de carbono orgánico contenido en cada materia prima.

$N = \%$ de nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima.

$Q =$ Peso fresco de cada materia, expresado en kilos o toneladas.

Tabla 2. 4 : Valores aproximados de la relación C/N de algunos residuos

materiales	%C	%N	C/N
bovinos	30	1.30	25:1
equinos	40	0.80	50.:1
ovinos	35	1	35:1
porcinos	25	1.5	16:1
caprinos	40	1	40:1
excretas humanas	2.5	0.85	3:1
paja trigo	46	0.53	87:1
paja cebada	50	0.64	90:1
paja arroz	42	0.63	67:1
paja avena	29	0.53	55:1
hojas secas	41	1	41:1
aserrín	44	0.06	730:1

Fuente: "manual de biogás". Varnero Moreno María Teresa.

2.1.2.5. Niveles de sólidos totales (S.T.).

Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada *sólidos totales* (ST). El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con que se carga el digestor es un actor importante a considerar para asegurar que el proceso se efectúe satisfactoriamente. La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas.

Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores semi-continuos no debe tener más de un 8% a 12 % de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos, que tienen entre un 40 a 60% de sólidos totales.

Para calcular el volumen de agua que se debe mezclar con la materia prima para dar la proporción adecuada de sólidos totales, es necesario conocer el porcentaje de sólidos totales de la materia prima fresca.

Para saber cuánta agua se debe agregar por kilo de excretas frescas se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$\%S.T. (Carga\ diluida) = \frac{(1kg\ residuo)(\% S.T.\ residuo)}{kgtotal\ residuo}$$

2.1.2.6. Valores límites en la fermentación métrica.

Se considera que las bacterias son el elemento esencial para tal proceso, por el cual es necesario mantenerlas en condiciones que permitan optimizar su ciclo biológico. Para mantener un sistema de tratamiento anaerobio que establezca eficazmente un residuo orgánico, las bacterias no metanogénicas y metanogénicas deben estar en un equilibrio dinámico. Para establecer y mantener dicho estado se debe tomar en cuenta los valores límites en las cuales su desarrollo es el óptimo.

Tabla 2. 5 : Valores limites en la fermentación

Parámetro	optimo	extremo
pH	6,8-7,4	6,4-7,8
Potencial oxido-reducción (m,v)	520-530	490-550
Ácidos volátiles (mg/l acético)	50-500	<2000
Alcalinidad total (mg/l CO ₃)	1500-5000	1000-5000
Temperatura °C	30-34	
Composición del gas %CH ₄	65-70	
NH ₄ (mg/lN)		3000
Na (mg/l)		3500-5500
K (mg/l)		2500-4500
Ca (mg/l)		1000-1500

Fuente: “depuración de agua residuales”. Hernández Muñoz Aurelio.

2.1.2.7. Sólidos volátiles.

La cantidad de sólidos volátiles es de suma importancia para conocer la velocidad de carga que expresa la relación entre la masa del material degradable que ingresa al biodigestor y el volumen del mismo. El material degradable se expresa en función de los sólidos volátiles (SV) existentes.

La velocidad de carga debe encontrarse entre 1 y 6 kg de SV/m³_{biodigestor}. Día. Y dependiendo del biodigestor a utilizar será la velocidad de carga a utilizar:

Tabla 2. 6: Velocidad de carga.

Velocidad de carga	Tipo de Biodigestores.
0	Poca alimentación
1	Diseños rurales con poca agitación y sin calefacción.
2-5	Diseños rurales con calefacción.
6	Biodigestores de alta eficiencia y laboratorios.

Fuente: "Biodigestores de pequeña escala". Instituto nacional de tecnología agropecuaria.

CAPITULO III

BIODIGESTORES

III.BIODIGESTORES.

Se les llama biodigestores a los depósitos en los que tiene lugar la digestión anaerobia aprovechando el recurso de la biomasa; a grandes rasgos se pueden definir como recipientes o tanques que permiten la carga de sustratos y descarga de bioabono y también poseen un sistema de recolección de biogás para su aprovechamiento energético.

3.1. Componentes de Biodigestores anaerobios.

Los principales componentes de un digestor anaeróbico lo constituyen un reactor o contenedor de las materias primas a digerir; un contenedor de gas, con los accesorios para salida de biogás, entrada o carga de materias orgánicas primas y salida o descarga de materias orgánicas estabilizadas.

3.1.1. Reactor.

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

3.1.2. Entrada del afluente.

Normalmente, el afluente se introduce por la parte superior del digestor y el sobrenadante se extrae por el lado contrario.

3.1.3. Salida del efluente.

En un digestor de cubierta fija puede haber de 3 a 5 tubos de sobrenadante colocados a distintos niveles, o un único tubo con válvulas a distintos niveles, para la extracción del mismo. Por regla general, se elige aquel nivel que extraiga un efluente de mejor calidad (con la menor cantidad posible de sólidos).

3.1.4. Extracción de lodos.

Las tuberías de extracción de lodos suelen estar colocadas sobre bloques a lo largo del suelo inclinado del digestor. El lodo se extrae por el centro del reactor. Estas tuberías tienen, por lo general, 15 cm de diámetro o van equipadas con válvulas tapón para evitar obstrucciones, y se utilizan para llevar periódicamente el lodo del digestor a un sistema de evacuación de lodos.

3.1.5. Sistema de gas.

El proceso de digestión anaerobia produce de 400 a 700 litros de gas por cada kilogramo de materia orgánica degradada, según las características del sustrato a utilizar. El gas se compone fundamentalmente de metano y anhídrido carbónico. El contenido en metano del gas de un digestor que funcione adecuadamente variará del 65% al 70% en volumen, con una oscilación en el anhídrido carbónico del 30% al 35%. Uno o dos por ciento del gas del digestor se compone de otros gases.

3.1.5.1. Cúpula de gas.

Habitualmente, la parte superior del digestor, llamada domo o cúpula o campana de gas, se utiliza para almacenar el biogás que se genera. Esta campana de almacenamiento puede ser rígida o flotante. En algunos casos, está separada del digestor y se le llama gasómetro.

Si la presión de gas sube por encima de los 30 cm de columna de agua, se escapará a través del cierre de agua hacia la atmósfera, sin levantar la cubierta. Si se extrae el lodo o se utiliza el gas con demasiada rapidez, el vacío puede pasar de los 20 cm y romper el cierre de agua, permitiendo la entrada del aire en el tanque. Sin el cierre de agua el vacío aumentaría enormemente y destrozaría el tanque.

3.2. Clasificación de Biodigestores.

Los diseños utilizados para la digestión anaerobia pueden clasificarse según su forma de operación y frecuencia de carga la cual es una de las clasificaciones más comunes:

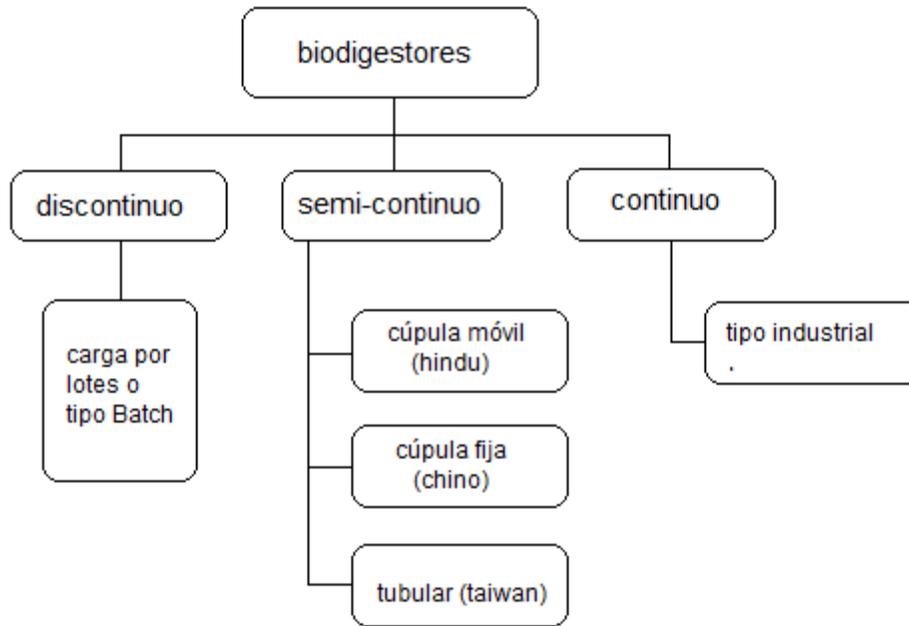


Figura 3. 1: Tipos de Biodigestores según su frecuencia de carga.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1. Biodigestor de carga discontinua.

El ciclo de producción de gas y fertilizante sólo puede ser continuado o reiniciado una vez que la carga y descarga del total del contenido de materia prima del digestor haya ocurrido.

- **Biodigestor tipo Batch.** (Ver figura 3.2) Como se menciona anteriormente, el reactor tipo Batch es un reactor donde no existe flujo tanto de entrada como de salida, es simplemente un reactor con un agitador que homogeniza la mezcla. Donde cada ciclo de operación se divide en cuatro etapas :

(1) **Alimentación:** el afluente es incorporado al reactor

(2) **Reacción:** etapa de tiempo variable en donde ocurre, en mayor grado, la degradación de la materia orgánica.

(3) **Sedimentación:** se detiene la agitación y la biomasa decanta, separándose del efluente clarificado

(4) **Descarga:** el efluente depurado (clarificado) es retirado del reactor. Este tipo de reactor presenta ciertas características particulares que lo hacen ventajoso frente a los sistemas convencionales continuos, dentro de las cuales destacan:

Ventajas del digestor discontinuo:

- Ocupa menor volumen de digestor por volumen de biogás producido, debido a la alta concentración de materia seca en el sustrato (40 – 60%)
- Ocupa de 60 – 80% menos de agua que los digestores continuos y semi continuos.
- No forma costra ni necesita agitación diaria.
- No sufre cambios de temperaturas violentos.
- Ocupa menos mano de obra, ya que no necesita carga diaria, sino cada 2 o 3 meses para carga y descarga. Durante el resto del tiempo, basta amontonar el material a usar.
- La mayor parte del bioabono se obtiene en forma sólida, siendo más fácil de esparcir en la preparación de suelos.
- No requiere de cuidados especiales que pueda causar accidentes en la fermentación anaeróbica.
- Se puede construir sobre el suelo o semi enterrado. Es ideal para localidades de nivel freático superficial o terreno en rocas.

Como este sistema de biodigestor tiene a la materia de principio a fin confinada, no hay sostenibilidad en la producción de biogás, es decir la cantidad del biogás va acorde a la cantidad de materia digerida, una vez agotada la materia orgánica, la producción de biogás también tendrá fin.



Figura 3. 2: Biodigestor tipo Batch.

Fuente: “chemical process equipment”. S.M Wallas.

3.2.2. Biodigestor de carga semi-continua.

Estos biodigestores se cargan o alimentan diariamente, con una carga relativamente pequeña en comparación al total contenido en el biodigestor a la vez que se saca de la cámara de descarga un volumen igual de líquido, para con ello mantener el volumen constante.

La producción de biogás es generalmente permanente, debido al constante suministro de nutrientes para las bacterias metanogénicas, responsables de generar el gas.

- **Biodigestor de cúpula móvil (hindú).** Es originario de India y se ha difundido mucho debido a la presión de trabajo constante que se logra en el proceso, generalmente son verticales, con el gasómetro incorporado del cual proviene su nombre, la estructura se construye de bloques y concreto, el gasómetro es de acero, lo que lo hace costoso.

El gasómetro posee una camisa que se desliza en un eje y lo mantiene centrado para que no roce con las paredes ni se oxide, este eje descansa en una viga transversal de concreto armado. Estos digestores son de alimentación continua, se construyen generalmente enterrados. Ver figura 3.3.

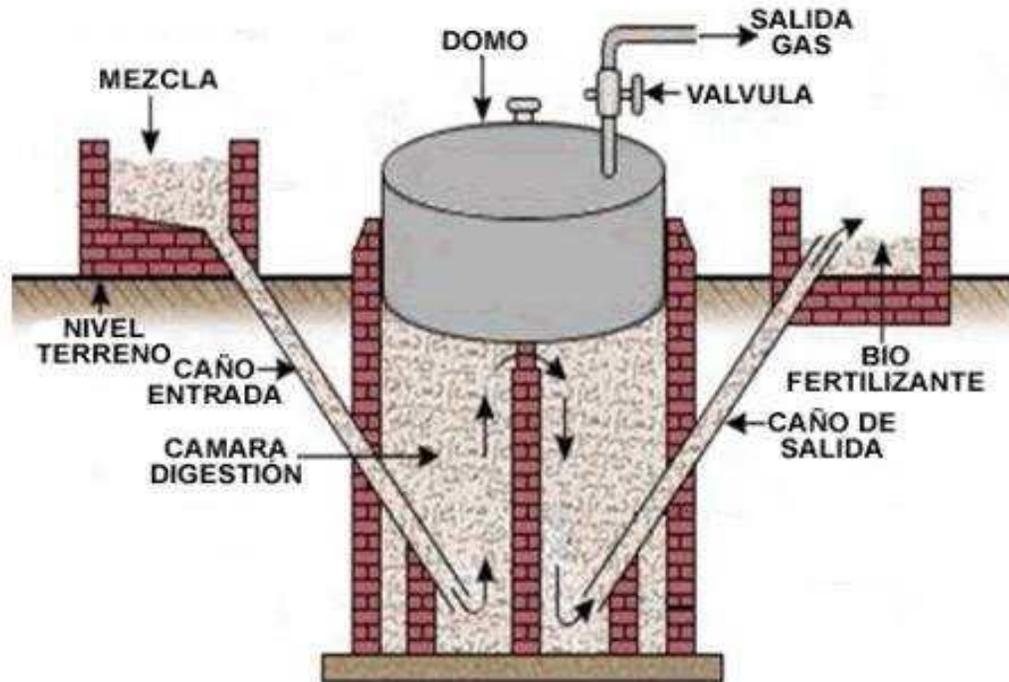


Figura 3. 3: Biodigestor de cúpula móvil.

- **Biodigestor de cúpula fija (chino).** Este modelo corresponde a un digestor de cúpula fija en forma cilíndrica, enterrado con cámaras de hidropresión. La estructura puede ser de hormigón, de ladrillo, bloques, adobes y se les puede adicionar el gasómetro externo. Este digestor por estar enterrado favorece el proceso fermentativo, con poca influencia por los cambios de temperatura, la desventaja que presenta es que la presión del gas es variable dependiendo del volumen acumulado. Ver figura 3.4.

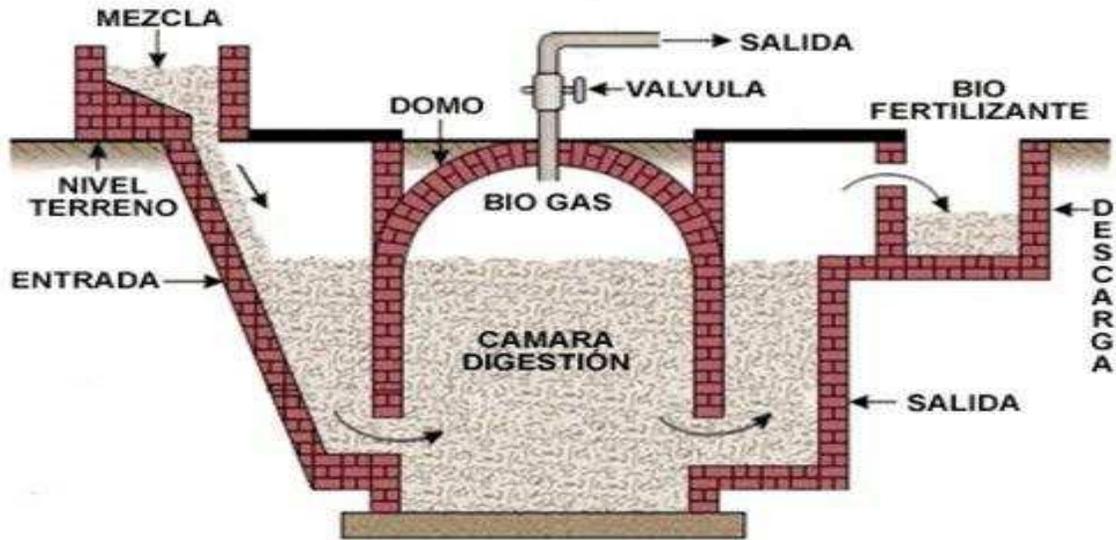


Figura 3. 4: Biodigestor de cúpula fija.

- **Biodigestor tubular (Taiwán).** En este digestor, el gas se va acumulando en la parte superior de la bolsa-reactor, parcialmente llena con materia orgánica en fermentación, la bolsa se va inflando lentamente con una presión baja.

El gas producido por el digestor puede almacenarse en un espacio añadido al digestor o conducirse independientemente a otra instalación de almacenamiento, cerca de la cocina, calefactor a usarse. Ver figura 3.5.



Figura 3. 5: Biodigestor tubular.

3.2.3. Biodigestor de carga continua.

Estos son cargados y descargados en forma regular y periódica de tal manera que la producción de gas y fertilizante (efluente o material orgánico fermentado) es permanente.

Cuando la alimentación del digestor es un proceso ininterrumpido, el efluente que descarga es igual al afluente o material de carga (que entra al digestor), con producciones de biogás, uniformes en el tiempo. Son utilizados principalmente para el tratamiento de aguas negras. Corresponde a plantas de gran capacidad, tipo industrial, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionándoles calefacción y agitación, así como para su control. Dado que se genera una gran cantidad de biogás, habitualmente, éste se aprovecha en aplicaciones industriales.

3.3. Biogás.

Se conoce como biogás “al gas producido mediante un proceso metabólico de descomposición de materia orgánica en ausencia total de oxígeno”. Este gas se encuentra constituido básicamente por metano (CH_4) y de dióxido de carbono (CO_2), conteniendo pequeñas porciones de otros gases como hidrogeno (H_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2).

3.3.1 Características y componentes del biogás.

El metano es principalmente el componente del biogás, el cual le confiere en gran parte sus características combustibles. Si se desea mejorar el poder calórico del biogás debe ser retirado el dióxido de carbono (CO_2), de esta forma se logra obtener metano en un 95%.

La presión adecuada para un óptimo uso del biogás oscila entre los 7 y los 20 mbar. Se debe tener especial precaución en este aspecto, para lo cual se debe calcular las pérdidas de presión de salida del gasómetro (adicionándole contrapesos en el caso de gasómetros flotantes).

Tabla 3. 1: Características del biogás.

características	Metano (CH ₄)	Dióxido de carbono (CO ₂)	Hidrogeno(H ₂) y sulfuro de hidrogeno(H ₂ S)	Otros	Biogás 60/40
Proporciones % volumen	55-70	27-44	1	3	100
Valor calórico kcal/m ³³	8600	-	2581	5258	5140
Ignición % en aire	5-15	-	-	-	6-12
Temperatura de ignición en °C	650-750	-	-	-	650-750
Presión critica en mpa	4.7	7.5	1.2	8.9	7.5-8.9
Densidad relativa	0.55	2.5	0.07	1.2	0.83
Inflamabilidad vol. en % de aire	5-15	-	-	-	6-12

Fuente: "Manual de biogás". La FAO.2011.

CAPITULO IV

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y BASES DE DISEÑO

IV.DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y BASES DE DISEÑO.

Uno de los Biodigestores más difundidos dentro del medio urbano, es el biodigestor autolimpiable de la marca *Rotoplas*, creado para la sustitución de fosas sépticas. Este permite la reincorporación de las aguas residuales domesticas al medio ambiente sin contaminar los mantos freáticos.

Las reacciones que se llevan a cabo dentro de este tipo de biodigestores son aerobias, por lo cual, hacer las debidas adecuaciones es de suma importancia, para una producción de biogás mediante reacciones anaerobias.

4.1. Biodigestor *Rotoplas* (tanque IMHOFF).

El tanque *Rotoplas* ó IMHOFF es una unidad de tratamiento primario cuya finalidad es la remoción de sólidos suspendidos. *Rotoplas* lo define como “un sistema para el tratamiento primario de las aguas residuales domésticas, mediante un proceso de retención y degradación séptica aerobia de la materia orgánica. El agua tratada es infiltrada hacia el terreno aledaño mediante una zanja de infiltración, pozo de absorción humedal artificial según el tipo de terreno y zona.” Ver figura 4.1.

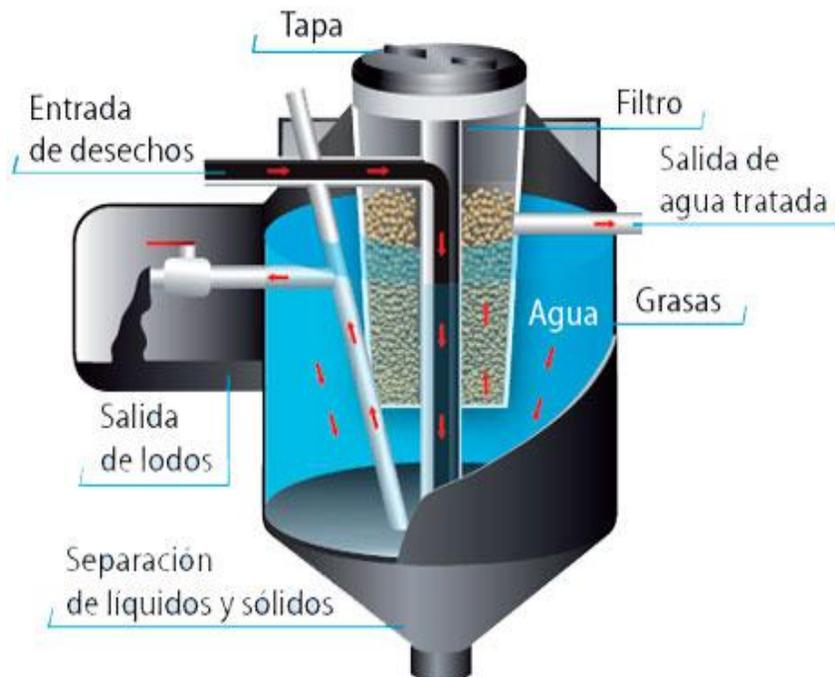


Figura 4. 1: Funcionamiento de biodigestor Rotoplas.

Fuente: “tanques Rotoplas”. <http://www.rcnegociossac.com/2.html>. [11 de junio 2015.]

Este se encuentra conformado principalmente de tres compartimentos. Ver figura 4.2:

- Cámara de sedimentación.
- Cámara de digestión de lodos.
- Área de ventilación y acumulación de natas.

Durante la operación, las aguas residuales fluyen a través de la cámara de sedimentación, donde se remueven gran parte de los sólidos sedimentables, estos resbalan por las paredes inclinadas del fondo de la cámara de sedimentación pasando a la cámara de digestión a través de la ranura con traslape existente en el fondo del sedimentador. Ya en la cámara de digestión, la materia comienza el proceso de degradación aerobia.

Los lodos acumulados en el digestor se extraen periódicamente y se conduce a lechos de secado, en donde el contenido de humedad se reduce por infiltración, después de lo cual se retiran y se disponen de ellos enterrándolos o pueden ser utilizados para mejoramiento de los suelos.

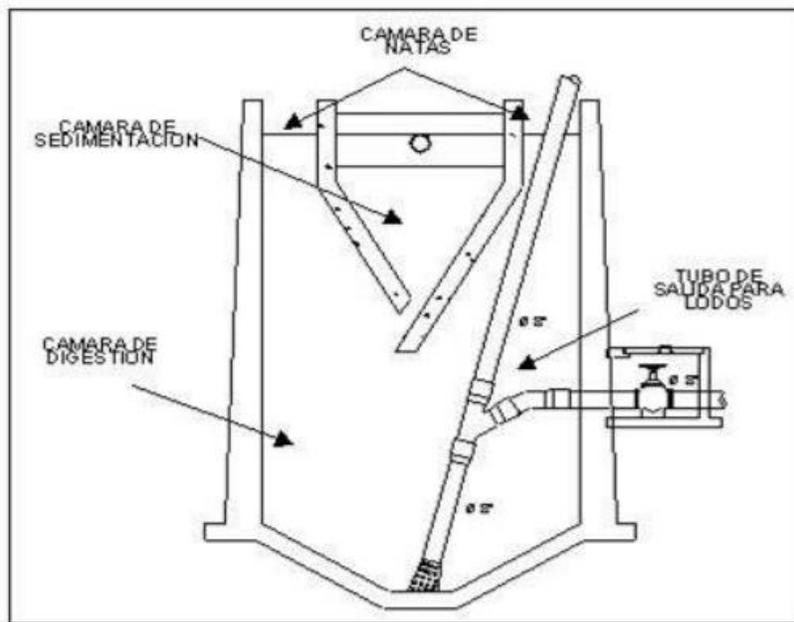


Figura 4. 2: Diagrama de tanque IMHOFF.

Fuente: “guía para el diseño de tanque sépticos, tanques IMOHFF y lagunas de estabilización”. Organización panamericana de la salud.

4.1.1. Especificaciones técnicas y componentes.

A fin de poder realizar los ensayos correspondientes, utilizaremos un biodigestor con capacidad de 600 litros. Cabe señalar que para la elección del tamaño del biodigestor, debemos tomar en cuenta la cantidad de biomasa producida por día.

Tabla 4. 1: Especificaciones técnicas.

Medidas	600 l.	1300 l.	3000 l.	7000 l.
A	0.85 m	1.15 m	1.45 m	2.36 m
B	1.64 m	1.96 m	2.67 m	2.65 m
C	1.07 m	1.25 m	1.75 m	1.36 m
D	0.95 m	1.15 m	1.54 m	1.25 m
E	0.32 m	0.45 m	0.72 m	1.10 m
F	0.24 m	0.24 m	0.20 m	0.26 m
G	0.55 m	0.55 m	0.55 m	0.55 m
H	0.03 m	0.03 m	---	0.08 m
I	4"	4"	4"	4"
J	2"	2"	2"	2"
K	2"	2"	2"	2"
L	45°	45°	45°	45°
M	0.66 m	0.89 m	0.89 m	0.89 m
N	0.35 m	0.318 m	0.318 m	0.318 m

Fuente: "ficha técnica. Biodigestor autolimpiable Rotoplas".

<http://www.rcnegociosac.com/pdf/Ficha%20tecnica%20del%20Biodigestor%20Rotoplas.pdf>. [11 de junio 2015.]

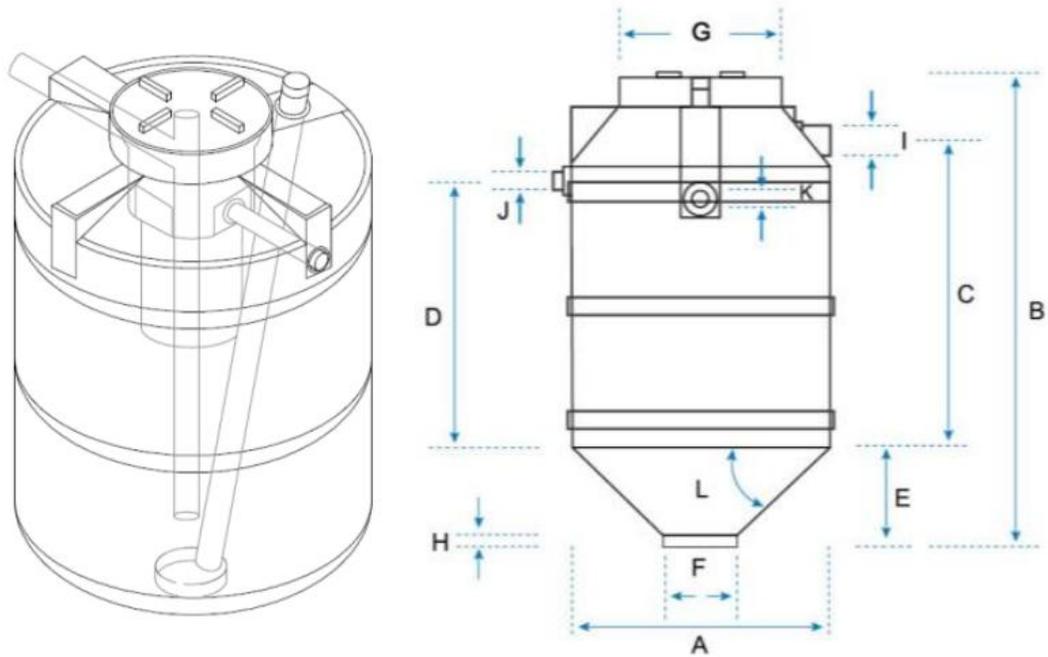


Figura 4. 3: Esquema técnico de biodigestor Rotoplas.

Fuente: “ficha técnica. Biodigestor autolimpiable Rotoplas”.

<http://www.rcnegociossac.com/pdf/Ficha%20tecnica%20del%20Biodigestor%20Rotoplas.pdf>. [11 de junio 2015.]

Componentes.

Los principales componentes del biodigestor Rotoplas o IMHOFF para su correcto uso son:

1. Tubería PVC de 4” para entrada de agua.
2. Filtro biológico con aros de plástico (pets).
3. Tubería PVC de 2” para salida de agua tratada al campo infiltración o pozo de absorción.
4. Válvula esférica para extracción de lodos.
5. Tubería PVC de 2” de acceso para limpieza y/o desobstrucción.
6. Tapa click de 18” para cierre hermético.
7. Base cónica para acumulación de lodos.

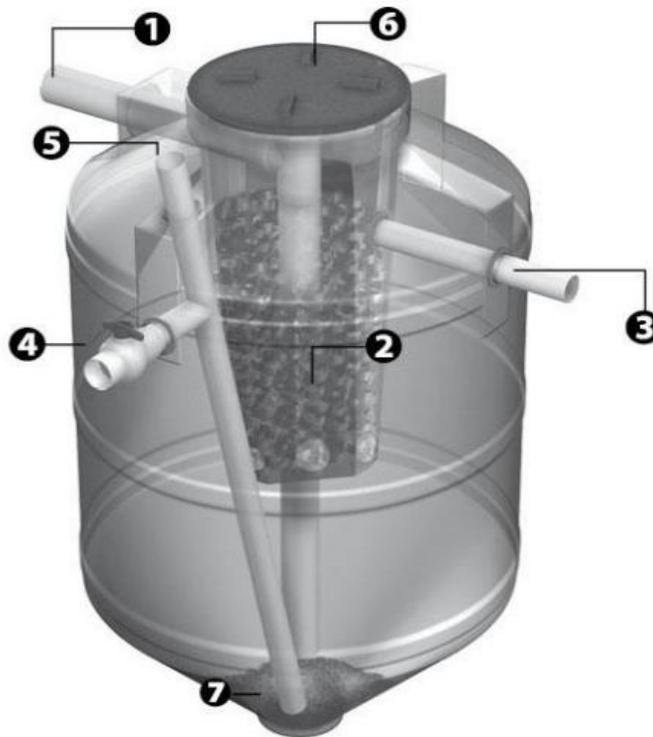


Figura 4. 4: Componentes de biodigestor Rotoplas.

Fuente: “ficha técnica. Biodigestor autolimpiable Rotoplas”.

<http://www.rcnegociossac.com/pdf/Ficha%20tecnica%20del%20Biodigestor%20Rotoplas.pdf>. [11 de junio 2015.]

4.2. Adecuación de tanque para aprovechamiento de biogás.

Para la correcta intervención en el biodigestor, debemos recordar que la descomposición anaerobia de la materia orgánica produce un gas combustible. Este gas contiene una alta porción en metano (CH_4) al cual se le designa como biogás. A partir de esta premisa se puede observar que una acertada adecuación, nos brindara la oportunidad de explotar este combustible a base de desperdicios, que comúnmente carece de algún valor para la sociedad.

El funcionamiento del biodigestor Rotoplas es llevado a cabo de la misma forma que los Biodigestores semi-continuos, es claro, que este no logra aprovechar el biogás, por lo que los cambios a realizar, se hicieron encaminados para el aprovechamiento del mismo.

De tal manera, se hicieron las adecuaciones correspondientes, de acuerdo a todos y cada uno de los componentes que forman un biodigestor, como lo son: entrada del afluente, salida de efluente, extracción de lodos, mecanismo de mezclado y un sistema colector de gas.

Nosotros al trabajar de forma semi-continua, proponemos que nuestro biodigestor se encuentre lleno a un poco más de tres cuartas partes de su volumen total, de tal manera que para evitar fugas futuras, todas las tuberías que se encuentren en el, salvo la del gas, deberán encontrarse sumergidas en la mezcla, con esto logramos un sello de agua en cada una de ellas y como se dijo antes, evitando las pérdidas de gas o de un mal funcionamiento por la entrada de oxígeno en el biodigestor.

4.2.1. Entrada del afluente.

La tubería del afluente que en un principio pasaba por el centro del biodigestor, nos limitaba la posibilidad de adaptar un mecanismo de mezclado, por lo que fue redirigida hacia una de las paredes del tanque, con ello logramos obtener un mayor espacio para dicho mecanismo, así como un mejor mezclado al no existir tanta obstrucción.

En la reestructuración de la tubería del afluente, debemos tener en cuenta que esta forme un sello de agua con la mezcla, por lo que cerciorarnos que se encuentre a una adecuada distancia es indispensable. Ver imagen 4.5.

4.2.2. Salida del efluente.

La tubería del efluente que se muestra en el diagrama original del biodigestor fue reubicada en donde anteriormente era la extracción de lodos, con ello el espacio libre para la generación del biogás aumenta puesto que esta se encuentra ligeramente más abajo del tanque, de tal manera que el volumen destinado al biogás será mayor. Con esto tratamos de evitar fugas futuras en consecuencia de altas presiones dentro del tanque.

En tal caso podemos observar en la imagen 4.4. que, lo que para ellos era la salida de agua asignada como el número tres, ahora para nosotros será la tubería a la que le asignan el número cuatro, eliminando la tubería que se dirigía hacia la parte baja del biodigestor, dejando solo la parte horizontal, clausurando la conexión para el desazolve, a la que le asignan el número cinco, así como la salida de aguas que ellos ofrecían. Ver imagen 4.5.

4.2.3. Extracción de lodos.

La tubería de extracción de lodos (acceso de limpieza y/o obstrucción) con que el biodigestor Rotoplas contaba, fue reconstruida para la salida de efluente como ya se menciona, de esta manera el ahorro de espacio es mayor. En vez de ella, se adecuó otra en la base del biodigestor utilizando una válvula de 4", con ello obtenemos una salida directa de los lodos ya digeridos, evitando los riesgos de obstrucciones o mal funcionamiento de la tubería pasada. Ver imagen 4.5

4.2.4. Mecanismo de mezclado.

Una vez liberado espacio dentro del tanque, se adecuó a una barra de acero inoxidable, aspas del mismo material, todo ello concéntrico al biodigestor, la cual es accionada de manera manual y con un sello de agua con un tubo de PVC de 2" así evitando la fuga del gas. El tipo de aspas, así como de sus dimensiones se explicara en incisos posteriores. Ver imagen 4.5.

4.2.5. Sistema de gas.

En el caso de nuestro biodigestor, este no contaba con ninguna salida de biogás por lo que se decidió crear una, de tal manera que esta se encontrara lo más próxima posible a la tapa del mismo, por lo que fue instalada en la parte que se destina a la rosca de la tapa, para ello, se utilizó una válvula de 3/4" de PVC, para así facilitar la salida del biogás. Ver imagen 4.6.

Por otra parte, para el sistema de almacenamiento del biogás, se utilizó un gasómetro llamado de campana flotante, el cual utiliza dos recipientes de diámetro distinto, de forma tal que uno pueda ser colocado dentro del otro. El biogás ingresa en el tanque invertido y a medida que continúe la producción este asciende.

Además de almacenar el biogás, el gasómetro permite regular la presión del sistema, que queda definida por la fuerza que ejerce su peso y el área donde este se apoya. Es por ello que al usar materiales livianos en el gasómetro, es necesario aumentar su carga para que la presión obtenida sea la adecuada para una buena combustión. Ver figura 4.12.

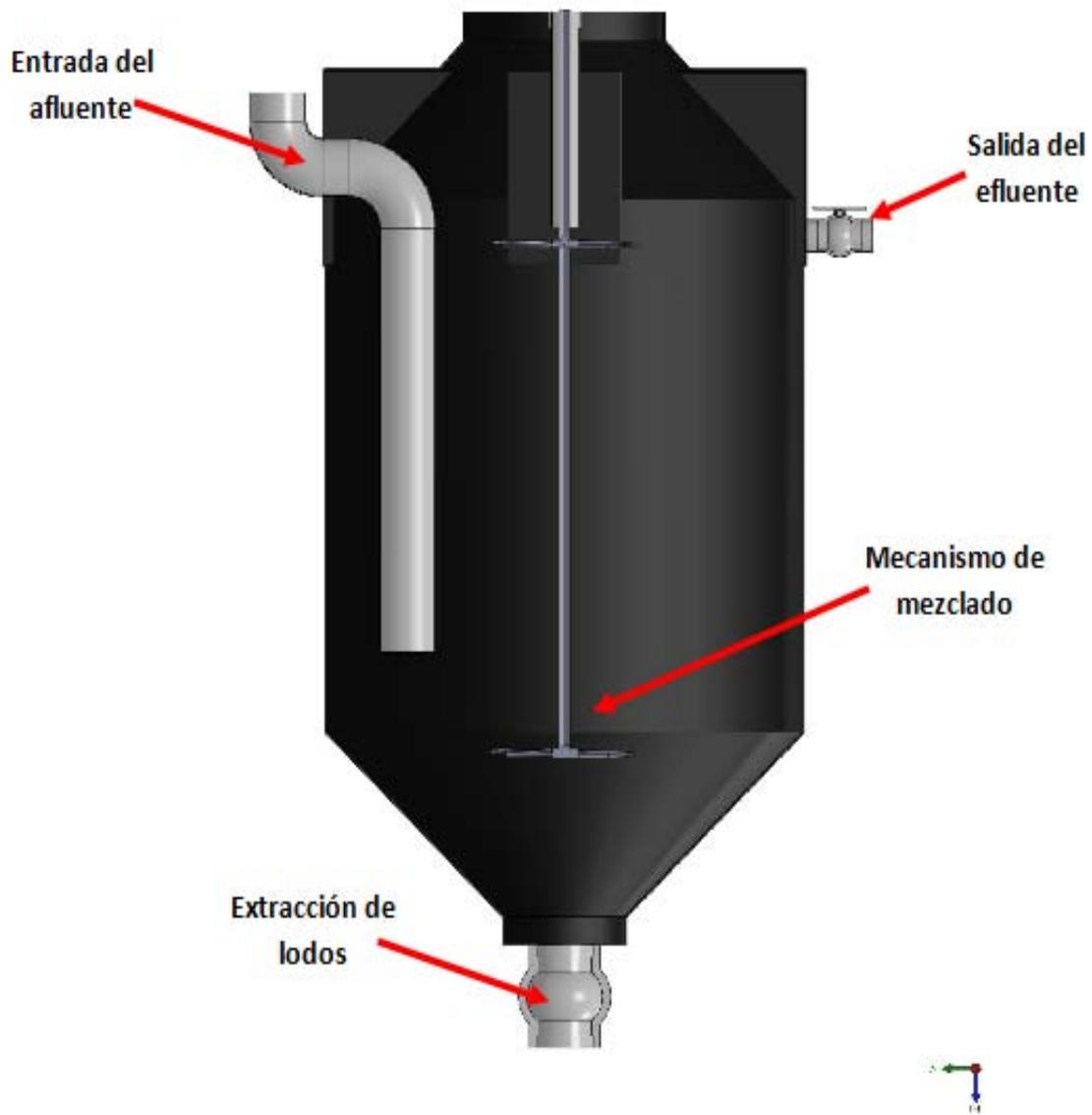


Figura 4. 5: Partes principales en biodigestor.
Elaboración propia.

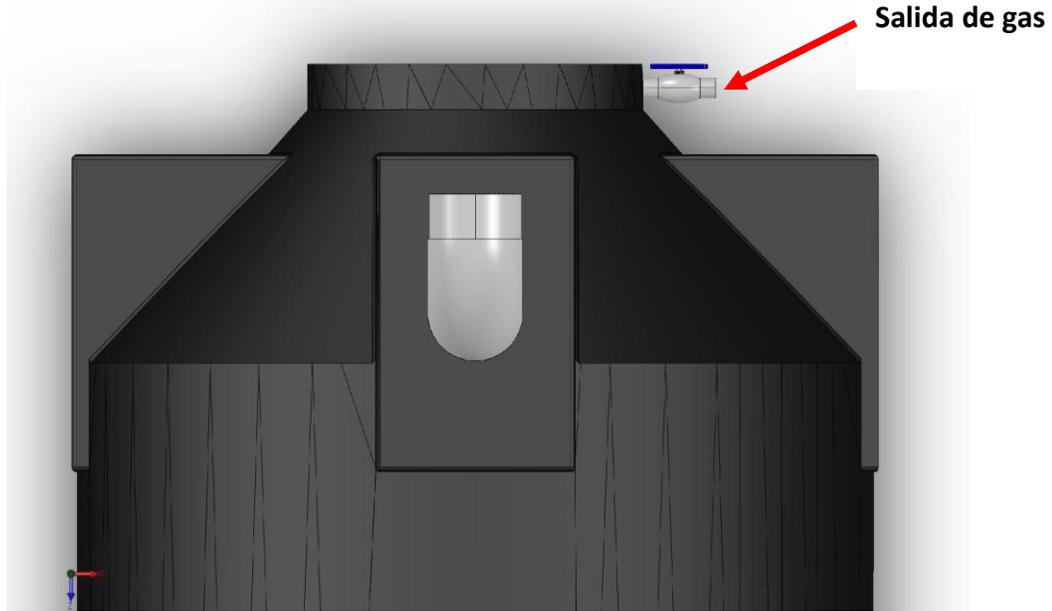


Figura 4. 6: salida de gas en el biodigestor.

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Capacidad de biodigestor.

Según la ficha técnica del biodigestor, su capacidad es de 600 litros, por lo que se procedió a corroborar esta información, así como también obtener el volumen que se le dedicara a la digestión.

El volumen destinado a la digestión del reactor ($V_{digestion}$), se cálculo mediante la adición de volúmenes de figuras geométricas básicas y con datos que nos ofrece la ficha técnica de nuestro equipo .Ver imagen 4.7.:

$$V_{total} = v_{cilindro} + v_{cono 1} + v_{cono 2} \quad \dots \text{ecuación (4.1).}$$

Donde:

$$v_{cilindro} + v_{cono 2} = V_d \quad \dots \text{ecuación (4.2).}$$

Volumen del cilindro:

$$V_{cilindro} = \pi \cdot r^2 h$$

Donde:

$$r = A/2 = 0.85m/2 = 0.425m$$

$$h = D = 0.95m$$

Sustituyendo valores:

$$V_{cilindro} = \pi \cdot 0.425^2 m \cdot 0.95m$$

Entonces:

$$V_{cilindro} = 0.539m^3 \cdot \frac{1,000litros}{1m^3} = 539litros$$

Volumen del cono 1:

$$V_{Cono 2} = \frac{\pi h}{3} (R^2 + r^2 + (R \cdot r))$$

Donde:

$$h = B - (D + E) = 1.64m - (0.95m + 0.32m) = 0.37m$$

$$R = A/2 = 0.85m/2 = 0.425m$$

$$r = G/2 = 0.55m/2$$

Sustituyendo:

$$V_{Cono 2} = \frac{\pi \cdot 0.37m}{3} (0.425^2 m + 0.275^2 m + (0.425m \cdot 0.275m))$$

Entonces:

$$V_{Cono 2} = 0.1445m^3 \cdot \frac{1,000litros}{1m^3} = 144.5 litros$$

Volumen del cono 2:

$$V_{\text{Cono 2}} = \frac{\pi h}{3} (R^2 + r^2 + (R \cdot r))$$

Donde:

$$h = E = 0.32m$$

$$R = A/2 = 0.85m/2 = 0.425m$$

$$r = F/2 = 0.24m/2 = 0.12m$$

Sustituyendo:

$$V_{\text{Cono 2}} = \frac{\pi \cdot 0.32m}{3} (0.425^2m + 0.12^2m + (0.425m \cdot 0.12m))$$

Entonces:

$$V_{\text{Cono 2}} = 0.0824m^3 \cdot \frac{1,000litros}{1m^3} = 82.4 \text{ litros}$$

Sustituimos valores en ecuacion (4.1):

$$V_{\text{total}} = 539 \text{ l} + 144.5 \text{ l} + 82.4 \text{ l}$$

$$V_{\text{total}} = 765.5 \text{ litros}$$

Sustituimos valores en ecuación (4.2):

$$V_d = 539 \text{ litros} + 82.4 \text{ litros}$$

$$V_d = \mathbf{621.4 \text{ litros}}$$

De tal forma tenemos que, la capacidad de trabajo es de 621 litros.

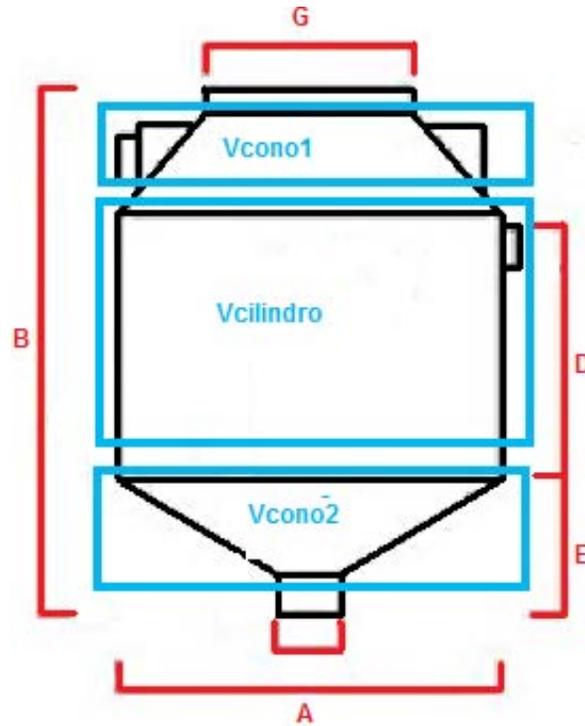


Figura 4. 7: Volumen de trabajo de digestión.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.1. Tiempo de retención.

Según datos del INEGI, la temperatura promedio en el municipio de Nezahualcóyotl, Edo. México, oscila de los 14-18°C, con lo que se espera, el biodigestor trabaje en la zona mesofílica comprendidas entre los 12°C y 35°C, con un tiempo de retención de 40-60 días hábiles para la producción de biogás.

Según tablas de Hernández a una temperatura de 18°C el tiempo de retención (TR) es aproximadamente de 45 días, para nuestro caso, utilizaremos un TR= 40 días, suponiendo que en los días de verano, la temperatura es ligeramente mayor.

Después de los cuarenta días TR a partir de la carga inicial, se espera que el biodigestor produzca biogás. Con esta información y el volumen de trabajo del biodigestor, es posible calcular la carga hidráulica Q.

4.3.2. Cálculo de carga hidráulica.

La carga de la mezcla de biomasa y agua que se suministrara en el biodigestor, parte del volumen de mismo reactor, así como del tiempo de retención de la materia:

$$Q = \frac{V_d}{TR}$$

Donde:

Q= carga hidráulica.

V_d = volumen de digestión.

TR= tiempo de retención.

Sustituyendo los valores anteriores, tenemos:

$$Q = \frac{621.4 \text{litros}}{40 \text{días}}$$

$$Q = 15 \text{litros/día.}$$

De tal manera, podemos interpretar que, agregaremos 15 litros de mezcla diaria, durante cuarenta días.

4.4. %sólidos totales.

Para asegurar el buen funcionamiento del biodigestor, debemos tener en cuenta que la cantidad de sólidos totales para un reactor semi-continuo, debe oscilar de un 8% a 12%.

Para ello, se llevo a cabo la medición de sólidos totales (ST) en residuos sólidos urbanos o de cocina, conforme a la noma mexicana de determinación de sólidos NMX-AA-034-SCFI-2001, para entonces, poder plantear de manera acertada el total de agua a agregar a nuestra mezcla, dando como resultado de las pruebas elaboradas lo siguiente:

Para una medición más certera se decidió tomar dos muestras de cada residuo para elaborar dicho análisis.

Tabla 4. 2: Pruebas para obtención de S.T. en residuos sólidos urbanos.

Tipo de residuo	G[gr] Peso del recipiente	S[gr] Peso del residuo	G ₁ [gr] Peso de residuo seco	G ₂ [gr] Peso de residuo quemado
Residuos de cocina 1	90.4089	5.3104	92.1220	90.5184
Residuos de cocina 2	94.3548	5.9820	96.4430	94.5486
Restos vegetales frescos 1	90.5327	5.6026	90.9404	90.5842
Restos vegetales frescos 2	91.2629	5.7808	91.6975	91.3209
Restos de frutas frescos 1	91.4181	6.5614	92.2515	91.5183
Restos de frutas frescos 2	101.9501	5.9163	102.7026	102.0706

Fuente: elaboración propia.

Una vez recolectadas las mediciones de las pruebas, la ecuación a utilizar para obtener el %ST de de las muestras es mediante la siguiente fórmula:

$$\%S.T. = \frac{(G_1 - G)}{S} \times 100$$

Sustituyendo valores tenemos que:

Tabla 4. 3: Porcentaje de sólidos totales en residuos sólidos urbanos.

Tipo de residuo	%S.T.	Valor medio de las pruebas %S.T.
Residuos de cocina 1	32.2593%	33.58%
Residuos de cocina 2	34.908%	
Restos vegetales frescos 1	7.27%	7.39%
Restos vegetales frescos 2	7.51%	
Restos de frutas frescos 1	12.701%	12.71%
Restos de frutas frescos 2	12.719%	

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se sacó la media del par de pruebas que se realizó para cada residuo, de forma que obtuviéramos un mejor resultado.

4.4.1. Sólidos totales al 10 %.

Recordemos que el porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con la que se carga el digestor, es un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se efectúe satisfactoriamente, la cual no debe tener más de un 8% a 12 % de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso.

Para facilitar los cálculos se optó llevar la mezcla que se adicionará al biodigestor a un 10 % de sólidos totales, con lo cual estaremos dentro de los límites citados en la literatura y con ello esperar que el biodigestor trabaje de manera óptima.

De tal forma que para adecuar nuestra mezcla, primero se realizó el cálculo total de los sólidos totales sin adicionar agua, mediante la siguiente fórmula:

$$\%S.T. = \frac{\sum_{i=1}^n kg \text{ residuo } i \times \%S.T. \text{ residuo}}{kg \text{ total residuo}}$$

Se obtuvo el valor medio de “S” (peso de residuo) de las dos pruebas realizadas para los tres diferentes residuos.

De tal forma que:

$$kg \text{ residuo} = \frac{S_{prueba1} + S_{prueba2}}{2}$$

Sustituimos valores:

$$kg \text{ residuo cocina} = \frac{5.3104 + 5.9820}{2} = 5.7gr$$

$$kg \text{ residuo vegetales} = \frac{5.6026 + 5.7808}{2} = 6.23gr$$

$$kg \text{ residuo frutas} = \frac{6.5614 + 5.9163}{2} = 5.6gr$$

Sustituimos los tres valores del peso de los residuos en nuestra ecuación principal:

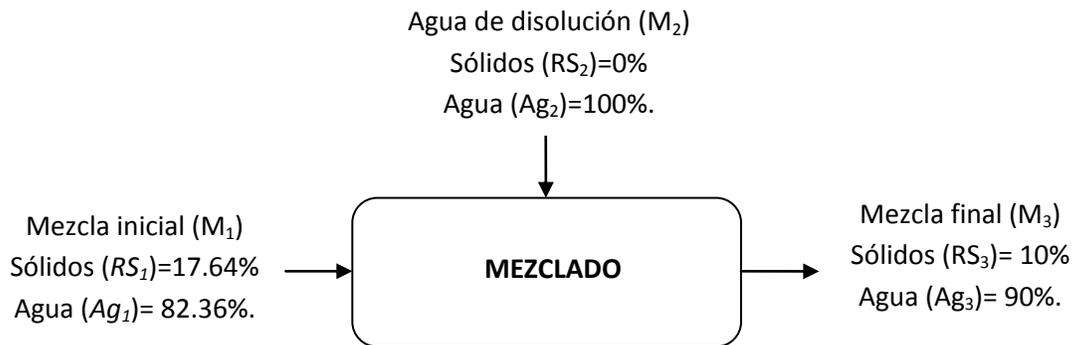
$$\%S.T. = \frac{(5.7gr)(0.0739) + (6.23gr)(0.1271) + (5.6gr)(0.3358)}{17.53gr}$$

$$\%S.T. = 17.64\%$$

De tal manera podemos decir que, en 100kg de mezcla tendremos 17.64kg de materia seca y 82.63litros de agua.

Mediante un balance de masas es posible realizar el cálculo para llevar 1kg de residuo a un 10%ST, el cual partimos de la siguiente forma:

- Partimos de la afirmación de que nuestra mezcla inicial a la que llamaremos M_1 , tendrá una cantidad de sólidos (RS_1) de 17.64% y de agua (Ag_1) de 82.36%.
- Para el agua a diluir (M_2), podemos afirmar que tendrá una cantidad de sólidos (RS_2) de 0% y de agua (Ag_2) de 100%.
- Por último, de nuestra mezcla final que estará constituida entre la mezcla inicial y el agua a diluir a la que llamaremos M_3 queremos que los sólidos contenidos (RS_3) sea de 10% con una cantidad de agua (Ag_3) de 90%.



De nuestro balance de masas podemos decir lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{para mezcla: } M_1 + M_2 &= M_3 && \dots (4.3) \\ 1kg + M_2 &= M_3 \end{aligned}$$

Esta será nuestra ecuación (4.3) de la cual conocemos la mezcla inicial, por lo que sustituimos su valor.

$$\text{para agua: } M_3(Ag_3) = M_1(\%Ag_1) + M_2(\%Ag_2) \quad \dots (4.4)$$

$$M_3(Ag_3) = 1kg(0.8236) + M_2(1)$$

$$\text{para sólidos: } M_3(\%RS_3) = M_1(\%RS_1) + M_2(\%RS_2) \quad \dots (4.5)$$

$$M_3(0.1) = 1kg(0.1764) + M_2(0)$$

De nuestra ecuación (4.5) despejamos a M_3 :

$$M_3 = \frac{1kg(0.1764)}{0.1} = 1.764kg$$

De la ecuación (4.3) sustituyo el valor de M_3 .

$$1kg + M_2 = M_3$$

$$1kg + M_2 = 1.764kg$$

Despejamos a M_2 de ecuación (4.3) para obtener la cantidad de agua que tendremos en 1.764kg de mezcla:

$$M_2 = 1.764kg - 1kg$$

$$M_2 = 0.764kg$$

Finalmente podemos decir que por 1kg de residuo tendremos que agregar 0.76kg de agua y conociendo que 1litro de agua es igual a 1kg podemos decir que:

$$10\%ST_{1kg \text{ de residuo}} = 1kg \text{ residuo} + 0.76 \text{ litros agua}$$

4.4.2. 10%ST para carga hidráulica (carga diaria).

Recordemos que de cálculos anteriores obtuvimos la cantidad de mezcla que se le va a adicionar al biodigestor diariamente, dando un total de 15litros diarios de dicha mezcla, cabe señalar que esta ya debe de estar adecuada, es decir, encontrarse a un 10%ST, por lo que partiremos a calcular que cantidad de residuo y de agua debemos agregar para obtener 15 litros de mezcla con dichas condiciones:

De tal forma que, para conocer la cantidad de cada componente de la mezcla, primero debemos saber cuál es la cantidad de agua total que tenemos en 1kg de residuos al 10%ST:

$$Agua\ total = Agua_{adicionada} + Agua_{residuo} \quad \dots (4.6)$$

Donde:

$$\begin{aligned} Agua\ total &= \text{agua de la mezcla al 10\%} \\ Agua_{adicionada} &= \text{agua agregada a la mezcla} \\ Agua_{residuo} &= \text{agua que contiene el residuo fresco} \end{aligned}$$

De nuestro %ST que calculamos anteriormente, sabemos que:

$$1\text{kg de residuos} = 0.8236\ \text{litros agua} + 0.1764\ \text{kg de ST}$$

Cabe mencionar que el kilogramo de residuos lo estamos considerando ya con la mezcla de los tres tipos de desperdicios con los que vamos a trabajar.

Sustituimos valores en ecuación (4.6):

$$Agua\ total = 0.76\ \text{litros}_{\text{agua adicionada}} + 0.82\ \text{litros}_{\text{agua de residuo}}$$

$$\mathbf{Agua\ total = 1.58\ \text{litros agua.}}$$

Ahora sabemos que, 1kg de residuos al 10%ST aporta 1.58 litros de agua que para los 15 litros diarios que requerimos, decimos lo siguiente:

$$kg\ residuo\ diario = \frac{\text{carga hidráulica} \frac{[litros]}{[litros]}}{Agua\ total \frac{[litros]}{[litros]}}$$

Sustituimos valores:

$$kg\ residuo\ diario = \frac{15 \frac{[litros]}{[litros]}}{1.58 \frac{[litros]}{[litros]}}$$

$$\mathbf{kg\ residuo\ diario = 9.49kg}$$

Sabemos que:

$$1\ \text{kg de residuo fresco} = 0.82\ \text{litros agua} + 0.17\ \text{kg ST}$$

Por lo que el agua total que aporta el residuo fresco diario es:

$$Agua\ de\ residuo\ diario = kg\ residuo\ diario \times Agua_{residuo}$$

$$Agua\ de\ residuo\ diario = 9.49kg \times 0.82\text{litros}$$

$$\mathbf{Agua\ de\ residuo\ diario = 7.78litros}$$

Y el total de agua a adicionar será:

$$Agua\ diaria\ a\ adicionar = kg\ residuo\ diario \times Agua_{residuo}$$

$$Agua\ diaria\ a\ adicionar = 9.49kg \times 0.76litros$$

$$\mathbf{Agua\ diaria\ a\ adicionar = 7.21litros}$$

Podemos decir que:

$$carga\ hidr\acute{a}ulica = agua\ de\ residuo\ diario + agua\ diaria\ a\ adicionar$$

$$carga\ hidr\acute{a}ulica = 7.78litros + 7.21litros$$

$$\mathbf{carga\ hidr\acute{a}ulica = 14.99litros \approx 15litros}$$

Por lo tanto, diariamente se mezclara 9.49kg de residuo fresco con 7.21 litros de agua, de tal forma que la carga hidraulica, así como del %ST se sigan conservando.

4.5. Tamaño de lote.

El tamaño de lote de  volumen de digestión es de 621.4 litros, para fines prácticos redondearemos esta cifra, por lo que, quedaría de la siguiente forma.

$$\mathbf{V_d = 621.4litros \approx 600litros}$$

Tenemos que 600 litros de mezcla son los que generarán biogás, por consiguiente, diremos que esto es un lote, 600litros = 1lote, el cual necesitamos expresarlo en masa, por lo que se prosiguió a calcular:

Partimos de la ecuación que dice que, la cantidad de masa que ocupa cierto volumen, se le conoce como densidad.

$$\rho = \frac{m}{v}$$

De la cual, conocemos el volumen de trabajo que es de 600litros y la densidad que puede calcularse experimentalmente, por lo que despejamos a "m", para así obtener la masa total que se encuentra en el biodigestor.

$$m = v \times \rho$$

Donde:

$m = M_{total}$ (la masa total dentro del biodigestor).

$v = V_d$ (Volumen de digestión).

$\rho = \rho_{mezcla}$ (Densidad de la mezcla).

Sustituimos valores:

$$M_{total} = V_d \times \rho_{mezcla} \quad \dots (4.7)$$

Donde:

$V_d =$ Volumen de digestión=600litros

$\rho_{mezcla} =$ Densidad de la mezcla

De tal forma, tenemos que para obtener la cantidad de masa que se encuentra el en biodigestor, necesitamos multiplicar el volumen de digestión que ya se conoce, por su densidad, la cual aún no conocemos, por lo que, para obtener la densidad de la mezcla(ρ_{mezcla}):

Se procedió con una probeta la cual fue pesada al encontrarse vacía, después esta fue llenada a un litro con la mezcla al 10% que se encontrará en el biodigestor. Esta se volvió a pesar, para así solo restar el peso de la probeta vacía a la llena:

$$\rho_{mezcla} = \frac{\text{probeta llena [kg]} - \text{probeta vacia[kg]}}{\text{volumen[litro]}}$$

Donde:

$\text{probeta llena} = [\text{kg}]$

$\text{probeta vacia} = [\text{kg}]$

$\text{Volumen}=1\text{litro}$

Sustituimos valores:

$$\rho_{mezcla} = \frac{1.5 [kg] - 0.25[kg]}{1[litro]}$$

$$\rho_{mezcla} = 1.2 \frac{kg}{l}$$

Por lo tanto, tenemos que un litro de nuestra mezcla al 10% tiene un peso de 1.2 kilogramos.

Sustituimos valores en ecuación (4.7).

$$M_{total} = 600 \text{ litro} \times 1.2 \frac{kg}{litro}$$

$$M_{total} = 720kg$$

De los 720 kg de mezcla que se encontrarán dentro del biodigestor sabemos que el 90% lo conformara agua y sólo el 10% de sólidos. Por lo que podemos conocer la masa de agua de la siguiente forma:

$$M_{H_2O} = 720kg \times \frac{90\%}{100\%}$$

$$M_{H_2O} = 648kg$$

Sabemos que la densidad del agua es de 1, por lo que podemos decir que, el volumen de agua contenido en el reactor es el siguiente:

$$V_{H_2O} = \frac{648kg}{1 \frac{kg}{litro}}$$

$$V_{H_2O} = 648litros$$

4.6. Relación carbono nitrógeno.

La materia prima que compondrá la mezcla de nuestro biodigestor, se conformara básicamente de restos de cocina, restos vegetales, así como de restos de frutas.

Tipo de residuo	C/N
Restos de cocina	15-25/1
Restos vegetales frescos	10-20/1
Restos de frutas	25-35/1

Para el cálculo de la relación C/N total, partimos de que cada materia estará en proporciones iguales. Tomando también la media del porcentaje C/N de cada residuo.

De tal manera tendríamos que:

	Tipo de residuo	kg	C/N
1kg	cocina	.333	20
	vegetales	.333	15
	frutas	.333	30

De la ecuación de C/N:

$$k = \frac{C1Q1 + C2Q2 + \dots + CnQn}{N1Q1 + N2Q2 + \dots + NnQn}$$

Donde:

K = C/N de la mezcla de materias primas.

C = % de carbono orgánico contenido en cada materia prima.

N = % de nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima.

Q = Peso fresco de cada materia, expresado en kilos o toneladas.

Sustituyendo valores:

$$k = \frac{20 \times 0.333kg + 15 \times 0.333kg + 30 \times 0.333kg}{1 \times 0.333kg + 1 \times 0.333kg + 1 \times 0.333kg}$$

$$k = \frac{21.64}{1} \left[\frac{C \cdot kg}{N \cdot kg} \right]$$

$$K = 21.64:1$$

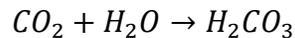
Por lo tanto:

En un kilogramo de mezcla tenemos una relación de 21.64:1, la cual está en el rango de trabajo dentro de nuestro biodigestor, que va de 30-20:1.

De tal manera que, si queremos aumentar nuestra relación, bastara con aumentar el porcentaje de fruta, para con ello mejorar nuestro proceso.

4.7. Control de pH.

Recordemos que, como resultado de la fermentación metánica, nuestras bacterias al consumir o degradar el sustrato dentro del biodigestor, generan principalmente metano (CH₄) y en menor cantidad, dióxido de carbono (CO₂). Este dióxido de carbono (CO₂), al entrar en contacto con la mezcla, que está conformada en su mayoría de agua, da lugar a la formación ácido carbónico (H₂CO₃) a través de la siguiente reacción:



Debido a la creación de ácidos carbónicos en nuestra mezcla, el pH desciende dentro del biodigestor, lo cual tendrá efectos adversos en el rendimiento de biogás en el sistema. Una estrategia adecuada para el control del pH puede ser el uso de una disolución reguladora o “buffer”, que son ampliamente utilizadas para mantener constante el pH en sistemas industriales.

4.7.1. Disolución reguladora de pH.

Una disolución amortiguadora, también llamada disolución buffer, reguladora o tampón, es aquella que limita los cambios de pH cuando en un sistema se generan especies ácidas o básicas.

Estas disoluciones reguladoras o buffer se utilizan para mantener un pH adecuado en determinaciones analíticas, ya que muchas reacciones dependen críticamente de la concentración de protones (H^+) en el medio, como es el caso del proceso anaerobio, en donde un pH incorrecto podría repercutir en la producción de las bacterias formadoras de metano.

4.7.1.1. Ecuación de Henderson-Hasselbach.

Esta relaciona las concentraciones de un ácido y su base conjugada con los valores de pH. La formula general para obtener el pH de una disolución reguladora es:

$$pH = pKa + \log \frac{[Base]}{[ácido]} \quad \dots (4.8)$$

Donde:

pH: Es el valor deseado dentro del biodigestor

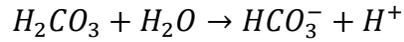
pKa: Es la fuerza relativa del ácido y su base conjugada

[*Base*] y [*ácido*]: las concentraciones molares de la base y el ácido en el sistema.

La fuerza de los ácidos puede ser comparada a través de una escala de pka, cuyos límites van de 0 a 14, los ácidos fuertes tendrán un valor de pka cercano a cero, mientras que los ácidos débiles tendrán un valor cercano a 14.

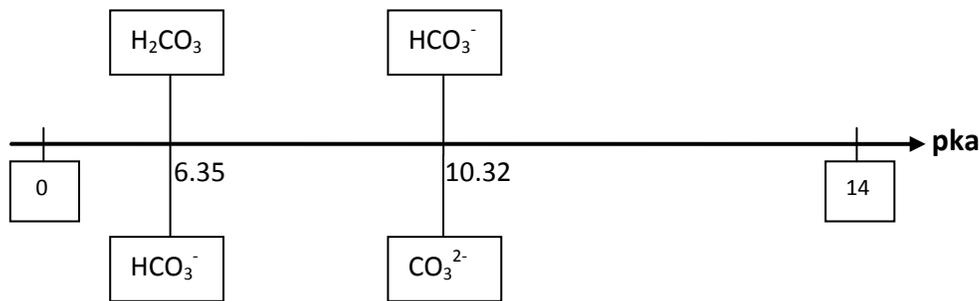
En el caso del ácido carbónico, sus dos valores de pka son los siguientes: para ácido carbónico-bicarbonato ($H_2CO_3 - HCO_3^-$)=6.35 y bicarbonato-carbonato ($HCO_3^- - CO_3^{2-}$)=10.32

En la parte superior de la escala se ponen los ácidos y en la parte inferior su base conjugada. En este caso nuestro ácido carbónico (H_2CO_3) se disocia parcialmente para dar bicarbonatos y protones:



En pocas palabras, el agua se comporta como base, aceptando un protón de nuestro ácido carbónico H_2CO_3 , formando $H^+ = (H_3O^+)$ y una base que es el bicarbonato HCO_3^- . Se dice entonces, que este ión carbonato (HCO_3^-) es la base conjugada del ácido carbónico (H_2CO_3), porque a todo ácido le corresponde una base conjugada y viceversa.

El proceso se repite y ahora el bicarbonato se disocia al ceder un protón al agua, formando carbonatos y H^+ .



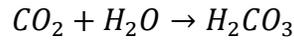
Como ya se mencionó, en el biodigestor se producirá de forma continua ácido carbónico, por lo que es evidente que, con la adición de una cantidad controlada de alguna de sus bases conjugadas, debería ser posible establecer una solución “buffer” bajo el esquema de la ecuación de Henderson-Hasselbach.

Como base de diseño, es posible definir que el biodigestor trabaje en un régimen de pH cercano a 7, el cual se encuentra en un rango óptimo, donde las bacterias formadoras de metano pueden multiplicarse y mantener una población estable, con lo que podríamos garantizar la máxima producción de metano, por lo tanto:

Si seleccionamos un pKa de 6.35, correspondiente al equilibrio, $H_2CO_3 \rightarrow HCO_3^- + H^+$, las únicas incógnitas restantes serán las concentraciones molares del ácido y su base.

$$7 = 6.35 + \log \frac{[Base]}{[ácido]}$$

Tenemos que, una molécula de dióxido de carbono reacciona con una molécula de agua para producir una molécula de ácido carbónico.



Donde, la cantidad de ácido carbónico dependerá de la población de microorganismos metanogénicos en el reactor. Puesto que ellos son los que generarán el dióxido de carbono (CO_2), el cual es el causante de la acidificación como ya se menciono anteriormente.

Recordemos que en la fase de la fermentación metánica de la digestión anaeróbica, es donde dichos microorganismos comenzarán a reproducirse de manera exponencial, hasta que eventualmente el agotamiento de los nutrientes determine el cese del crecimiento bacteriano. Es aquí donde la población bacteriana permanece más o menos constante, debido a que el crecimiento de nuevos individuos es contrarrestado por la muerte de los ya existentes, a la cual se le conoce como fase estacionaria en una curva de crecimiento bacteriano. (El ciclo de vida bacteriano se muestra en la figura 4.8.).

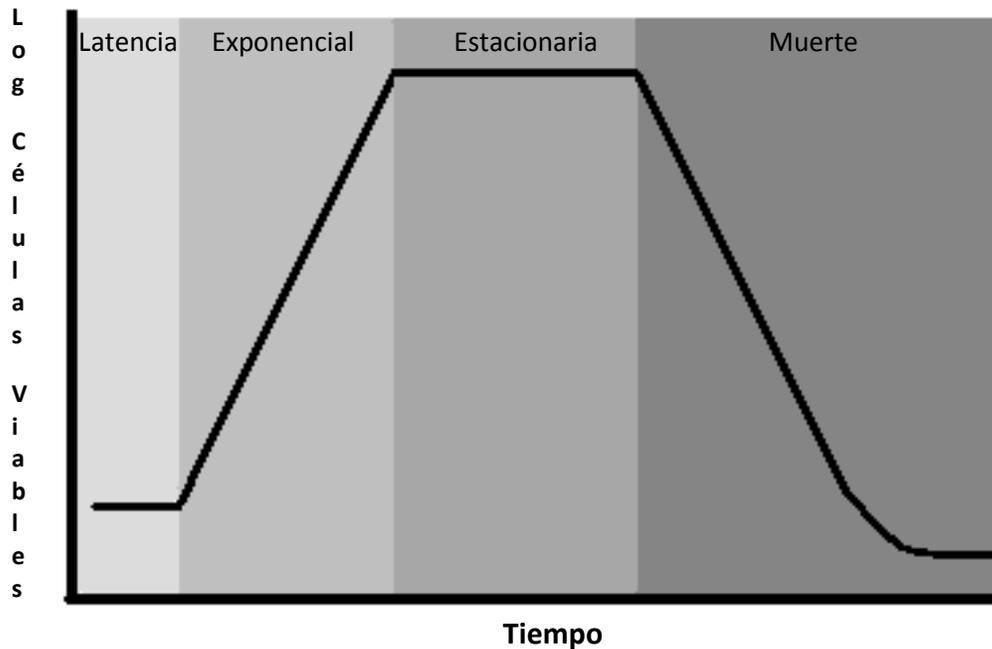


Figura 4. 8: Crecimiento bacteriano.

Fuente: Elaboración propia.

Según estudios previos sobre el crecimiento bacteriano metanogénico de residuos bovinos, en condiciones de temperatura mezofílica (temperaturas comprendidas de 12°C a 35°C) y con un pH neutro, las poblaciones bacterianas tienen una concentración máxima de 1.6×10^{18} por cada litro de mezcla aproximadamente.

Sabemos que el biodigestor contendrá un total de agua de 648 litros, por lo que podemos conocer el número total de bacterias que este contendrá en estado estacionario:

$$N_B^T = N_B^{max} \times V_{H_2O} \quad \dots (4.9)$$

Donde:

N_B^{max} = cantidad de bacterias en estado estacionario por cada litro de mezcla.

V_{H_2O} = volumen de agua dentro del biodigestor.

Sustituyendo valores de ecuación (4.9) se obtiene:

$$N_B^T = 1.6 \times 10^{18} \frac{\text{Bacterias}}{l} \cdot 648 l$$

$$N_B^T = \mathbf{1.0368 \times 10^{21} \text{total de bacterias}}$$

Sabemos que, la población bacteriana necesita de nutrientes para que esta pueda continuar en un estado estacionario, los cuales serán tomados de los 9.49 kg de carga diaria de desperdicios orgánicos que se agregarán al biodigestor, por lo que se espera que con ello, la cantidad de individuos se encuentre en su máximo nivel (estado estacionario).

También sabemos por estudios realizados en diferentes instituciones que, por cada kilogramo de residuos bovinos se generan aproximadamente 0.04m^3 de biogás, el cual está compuesto de metano y de CH_4 , en condiciones óptimas (70% metano y 30% dióxido de carbono).

Por lo tanto, podemos conocer la cantidad de CO_2 que se generará dentro del biodigestor, el cual se cree es el principal causante de la acidificación del reactor. Sabemos que la densidad del biogás es de 1.2 kg/m^3 , por lo que podemos conocer la cantidad de masa de CH_4 y CO_2 generada por los 9.49kg de residuos que diariamente se le agregarán al biodigestor:

Sabemos que 1kg de residuos generan 0.04m³ de biogás, por lo que para los 9.49kg diarios dará un total de:

$$Biogás_{día} = V_{teórico} \times kg \text{ residuo diario}$$

Por lo tanto:

$$Biogás_{día} = 0.04 \frac{m^3}{kg} \times 9.49 \text{ kg}$$

$$Biogás_{día} = 0.3796 \text{ m}^3$$

Conocemos la densidad del biogás por lo que podemos expresar la cantidad de biogás en masa, de la siguiente forma:

$$m \text{ biogás}_{día} = \rho \times V$$

Donde:

$$\rho = 1.2 \frac{kg}{m^3}$$

$$V = 0.3796 \text{ m}^3$$

Sustituyendo valores en la ecuación:

$$m \text{ biogás}_{día} = 1.2 \frac{kg}{m^3} \times 0.3796 \text{ m}^3$$

$$m \text{ biogás}_{día} = \mathbf{0.4555 \text{ kg}}$$

Entonces, podemos decir que, de los 9.49 kg de residuos al día se generarán mediante la metanogénesis un total de 0.4555 kg de biogás diario. Suponiendo que este biogás será optimo, podemos decir que su composición será de: 70%metano y 30%dioxido de carbono.

Por lo que, podemos también conocer tanto la cantidad de metano, cómo de dióxido de carbono:

$$kg \text{ de } CH_4 = \frac{70\%(0.4555 \text{ kg})}{100\%}$$

$$kg \text{ de } CH_4 = \mathbf{0.3188}$$

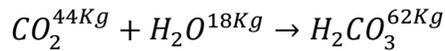
$$kg \text{ de } CO^2 = \frac{30\%(0.4555kg)}{100\%}$$

$$kg \text{ de } CO^2 = 0.1366$$

Ahora también conocemos que, diariamente se estarán generando 0.3188 kg de CH₄ y 0.1366 kg de CO².

Como ya se menciona anteriormente, el dióxido de carbono (CO₂) que se generará diariamente, al entrar en contacto con la mezcla, que está conformada en su mayoría de agua, da lugar a la formación ácido carbónico (H₂CO₃). Recordemos también que, de nuestra ecuación principal nos restaba conocer la concentración molar del ácido, para con ello poder definir la cantidad de buffer (base) a adicionar a nuestro biodigestor.

Sabemos que, en el biodigestor se llevará a cabo la siguiente reacción química, de la cual se genera el ácido carbónico:



Sí, la reacción química se encuentra balanceada, podemos decir que, 44kg de dióxido de carbono al reaccionar con 18kg de agua se generarán un total de 62kg de ácido carbónico. Que para el caso del biodigestor, sabemos que diariamente se generará 0.1366kg de dióxido de carbono, el cual reaccionará con los 648 litros de agua que fueron calculados anteriormente (esta cantidad de H₂O es el total de agua con un 10% de sólidos en el biodigestor):

CO ₂	H ₂ O	H ₂ CO ₃
44kg	18kg	62kg
0.1366kg	648kg	

Mediante una regla de proporcionalidad dictada por la reacción balanceada podemos conocer la cantidad de ácido carbónico generada en el biodigestor, de modo que:

$$kg \text{ de } H_2CO_3 = \frac{0.1366kg \text{ de } CO_2(62kg \text{ de } H_2CO_3)}{44kg \text{ de } CO_2}$$

$$kg \text{ de } H_2CO_3 = 0.1925$$

Ya sabemos que en el reactor se generarán 0.1925kg de ácido carbónico, por lo que para conocer su concentración molar, necesitamos conocer el número de moles que contienen los 0.1925kg de ácido carbónico:

$$n = \frac{m \left[\frac{g}{mol} \right]}{M}$$

Donde:

m= masa del ácido carbónico

M= masa atómica del ácido carbónico

Sustituimos valores:

$$n = \frac{0.1925kg \left(\frac{1000g}{1kg} \right)}{62 \frac{g}{mol}}$$

$$n = 3.105 \text{ moles}$$

Una vez, conociendo el número de moles, podemos saber que concentración molar por cada litro de agua en el biodigestor:

$$M = \frac{n_{moles}}{V[l]}$$

Donde:

$$n_{moles} = 3.105$$

$$V = 648 \text{ l}$$

$$M = [H_2CO_3]$$

Sustituimos valores y resolvemos:

$$[H_2CO_3] = \frac{3.105 \text{ moles}}{648 \text{ l}}$$

$$[H_2CO_3] = 0.00479 \frac{mol}{l}$$

Tenemos que, la concentración molar será de 0.00479.

Conociendo la concentración molar, podemos entonces regresar a la ecuación (4.8) de Henderson-Hasselbach y sustituir $[H_2CO_3]$:

$$7 = 6.35 + \log \frac{[Base]}{[cido]} \rightarrow 7 = 6.35 + \log \frac{[Base]}{[H_2CO_3]}$$

Donde:

$$[H_2CO_3] = 0.00479 \frac{mol}{l}$$

Despejamos la concentración molar de la base y resolvemos:

$$7 = 6.35 + \log \frac{[Base]}{[0.00479]}$$

$$7 - 6.35 = \log \frac{[Base]}{[H_2CO_3]}$$

$$0.65 = \log \frac{[Base]}{[H_2CO_3]}$$

Aplicamos exponencial de base 10 en ambas partes de la ecuación:

$$10^{0.65} = \frac{[Base]}{[0.00479]}$$

Despejamos la base y resolvemos:

$$[Base] = 0.00479 \frac{mol}{l} \times 10^{0.65}$$

$$[Base] = 0.0214 \frac{mol}{l}$$

Como ya se menciona anteriormente, la elección del buffer a utilizar esta dado mediante la tabla pka, la cual nos estableció que el compuesto a adicionar será un bicarbonato, puesto que este es su base conjugada del ácido carbónico.

En nuestra propuesta del compuesto químico a utilizar como buffer, se encontraba el bicarbonato de sodio y el bicarbonato de calcio, de los cuales se cree que, el bicarbonato de calcio es el más apto, pues este al no ser tan soluble en agua como el bicarbonato de sodio, le ofrecerá al biodigestor sólo la cantidad de buffer necesaria y el restante del compuesto se conservará sin diluir hasta que el biodigestor de nueva cuenta necesite estabilizarse y diluya lo restante del compuesto, lo que nos brindaría un mecanismo acertado en la regulación del pH, puesto que, al no diluirse del todo con la mezcla que en el biodigestor se encuentra, podemos descartar que ella se vuelva básica, lo que traería problemas en la producción de biogás.

Una vez seleccionado el buffer a utilizar, necesitamos conocer cuántos kg de este se le agregarán por día, puesto que sólo conocemos la cantidad de mol/l de la base, necesitamos primeramente saber la cantidad de moles en relación con el volumen de agua del biodigestor:

$$n = M \times V$$

Donde:

$$M = [Base] = 0.0214 \frac{mol}{l}$$

$$V = 648 l$$

Sustituimos valores y resolvemos:

$$n = [Base] \times 648 l$$

$$n = 0.0214 \frac{mol}{l} \times 648 l$$

$$n = 13.86 mol$$

Utilizando la masa molar de buffer (bicarbonato de calcio), podemos entonces conocer la cantidad en kg que de este se le va a adicionar:

$$\text{Masa molar de CaCO}_3 = \text{Ca}^{40}\text{CO}_3^{12,48}$$

$$\text{Masa molar de CaCO}_3 = 100 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Multiplicamos la masa molar del bicarbonato de calcio por el número de moles:

$$\text{Masa CaCO}_3 = 13.86 \text{ mol} \times 100 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\text{Masa CaCO}_3 = 1386 \text{ gramos} = 1.386 \text{ kg}$$

De modo que, diariamente se le agregarían al biodigestor 1.386 kg de buffer, para que con ello este lograra estabilizarse y mantener una producción de biogás máxima al encontrarse en un pH neutro.

Cabe destacar que, estos son sólo valores estimados a partir de la reacción que se lleva a cabo al entrar el dióxido de carbono en contacto con el agua dentro del reactor, puesto que en la literatura se habla de un complejo mecanismo de reacciones químicas, todas estas llevadas a cabo en el proceso de la biodigestión, las cuales ellas ayudan a que el biodigestor pueda autorregular su pH sin la ayuda de un buffer, y que si fuese el caso de regularlo externamente, en ella no se menciona nada claro con respecto a la cantidad y el tipo de buffer que para ello se utiliza.

Por lo que está es una simple propuesta para intentar darle una explicación al proceso de regulación del pH en el biodigestor, puesto que nuestra suposición parte de que todo el dióxido de carbono creado en la etapa de la metanogénesis, reaccionaría con el agua dentro del biodigestor, situación que no es del todo posible, puesto que el biogás que obtenemos está compuesto en su mayoría de metano y un restante de dióxido de carbono, por lo que se cree que, quizás sólo la decima parte o menos del dióxido de carbono fuese el que reaccionaría con el agua.

4.8. Mezclado.

Como se ha mencionado anteriormente, un buen mezclado debe de garantizar: una buena homogenización del sustrato de alimentación con el sustrato en digestión, la distribución de calor para mantener una isoterma adecuada, así como el evitar la formación de espumas o la sedimentación, son los principales puntos que se deben considerar a la hora de elegir un mezclador.

Para ello se consideró al fluido compuesto de biomasa y agua que se encuentra dentro del biodigestor, como Newtoniano cuya viscosidad puede considerarse constante en el tiempo. Recordemos que en un fluido Newtoniano la viscosidad es independiente de la agitación y sólo depende de la temperatura y de su composición.

4.8.1. Mezclado por hélice.

El mezclado con hélice produce principalmente corrientes axiales (longitudinales), las cuales son empleados para fluidos de baja viscosidad, como es el caso de la mezcla dentro del biodigestor que en su mayoría está compuesta de agua. Ver imagen 4.9. :

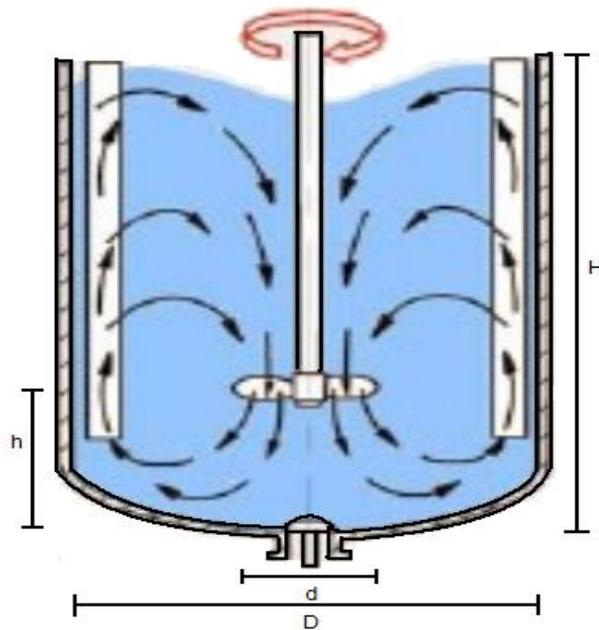


Figura 4. 9: Flujo axial en reactor por hélice.

Fuente: elaboración propia.

- El mezclado axial que nos otorgan las hélices, ayudará a la recirculación de la biomasa por todo el contenedor, así como el evitar la sedimentación.
- Otro punto importante, es el mezclado tenue que nos ofrece, de esta manera evitamos turbulencias innecesarias que pueden afectar a las bacterias metanogénicas.
- Mantiene en suspensión partículas pesadas, de esta forma gran parte de los sólidos estarán homogeneizados dentro del reactor.

Tabla 4. 4: Ficha técnica de una hélice.

Denominación		Hélice
Flujo primario		axial
Rango de utilización	d/D	0.1-0.5
	Viscosidad (Pa.s)	$\mu < 20$
	h/d	1.50
comentarios		Tanques pequeños. Baja agitación en tanques grandes. Baja viscosidad.

Fuente: “agitadores”. Link industrial, Process Engineering Equipment. <http://www.linkindustrial.es>. [18 de junio 2015.].

Debido a las características que nos ofrece este mezclador tipo hélice, así como las del fluido dentro del reactor, fue que lo seleccionamos para dicha tarea, con ello se espera que el biodigestor trabaje de manera adecuada, evitando la sedimentación y espumas principalmente.

Este fue soldado en el extremo inferior de una barra de acero inoxidable de 3/4”, con un largo que se calculó de la siguiente forma:

Contamos con una hélice de 30cm de diámetro y sabemos que la relación de la parte inferior del biodigestor con el tamaño de la hélice, debe ser de 1.50, de tal forma que lo podemos representar de la siguiente manera.

$$\frac{h}{d} = 1.50$$

Donde:

h = distancia de la base del reactor a la hélice.

d = diámetro de la hélice.

Conocemos el diámetro de la hélice que es de 30cm, por lo que despejamos h de la ecuación, para obtener la distancia a la que debemos colocar la hélice.

$$h = 1.50 \times d$$

Sustituimos valores:

$$h = 1.50 \times 30cm$$

Por lo tanto:

$$**h = 45cm.**$$

De tal forma, tenemos que la distancia de la hélice a la base del biodigestor será de 45cm, por lo que ahora solo restamos a la altura completa del biodigestor los 45cm, para de esta forma poder situar la hélice de manera correcta:

$$l_b = H - h$$

Donde:

l_b = largo de la barra.

H = altura del biodigestor = 1.64cm.

h =45cm.

Sustituimos valores:

$$l_b = 1.64cm - 45cm$$

$$**l_b = 1.19cm**$$

Por lo tanto, el largo de la barra será de 1.19cm a partir de la tapa del digestor. Como nuestro tanque es algo grande, para cerciorarnos que exista un buena mezcla en el, optamos por integrar una hélice más, con el mismo sentido que la otra para evitar turbulencias y a una distancia de 10cm de profundidad a partir de la altura de la mezcla, la cual está regida por la altura de nuestra tubería de salida del efluente, la cual se encontrará a una distancia de 37cm a partir de la tapa del digestor. Ver imagen 4.10.

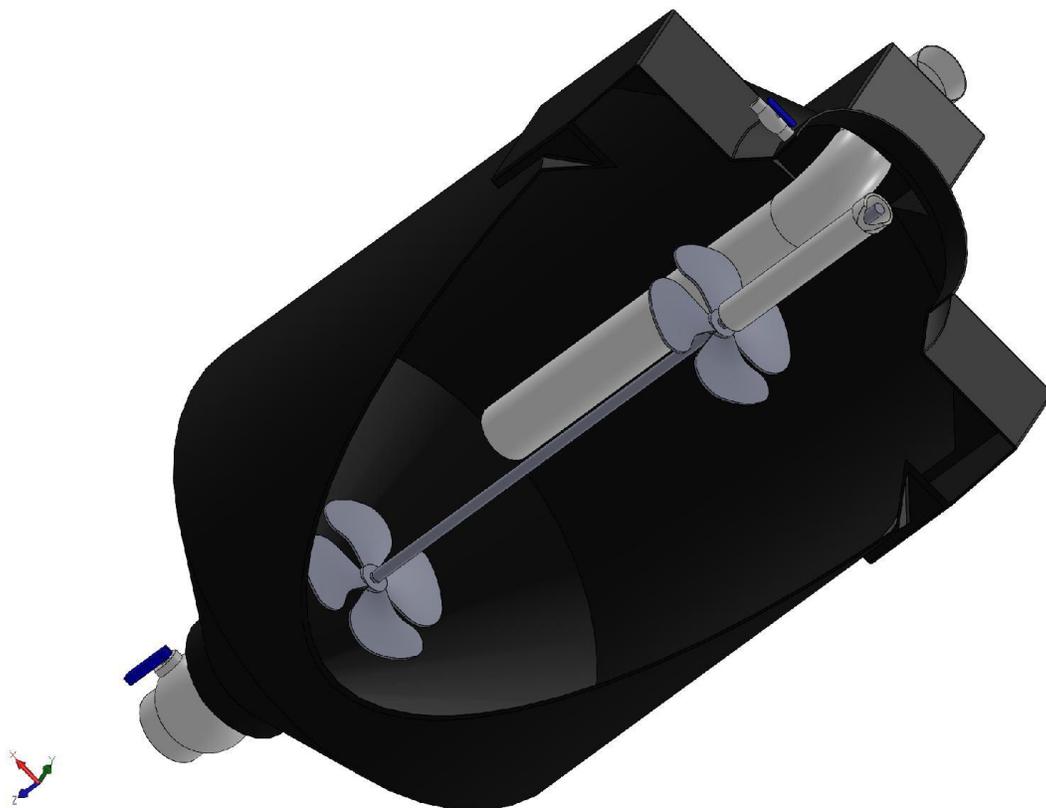


Figura 4. 10: Biodigestor y sus componentes mezcladores.

Fuente: elaboración propia.

4.9. Presión de trabajo.

Una vez que el biodigestor se encuentre en funcionamiento, podríamos aseverar las siguientes características:

- El biodigestor al encontrarse conectado al gasómetro mediante una manguera para gas, se les podría considerar como un mismo contenedor.
- Las válvulas que controlan el afluente y efluente estarán cerradas, por lo que, al existir presión debido a la generación del biogás, el gasómetro será el único que se muestre afectado.
- A mayor presión dentro del sistema, el gasómetro comenzará a ascender. Este suceso ocurrirá cuando: la presión interna sea mayor que la ejercida por el peso de la parte móvil del gasómetro.

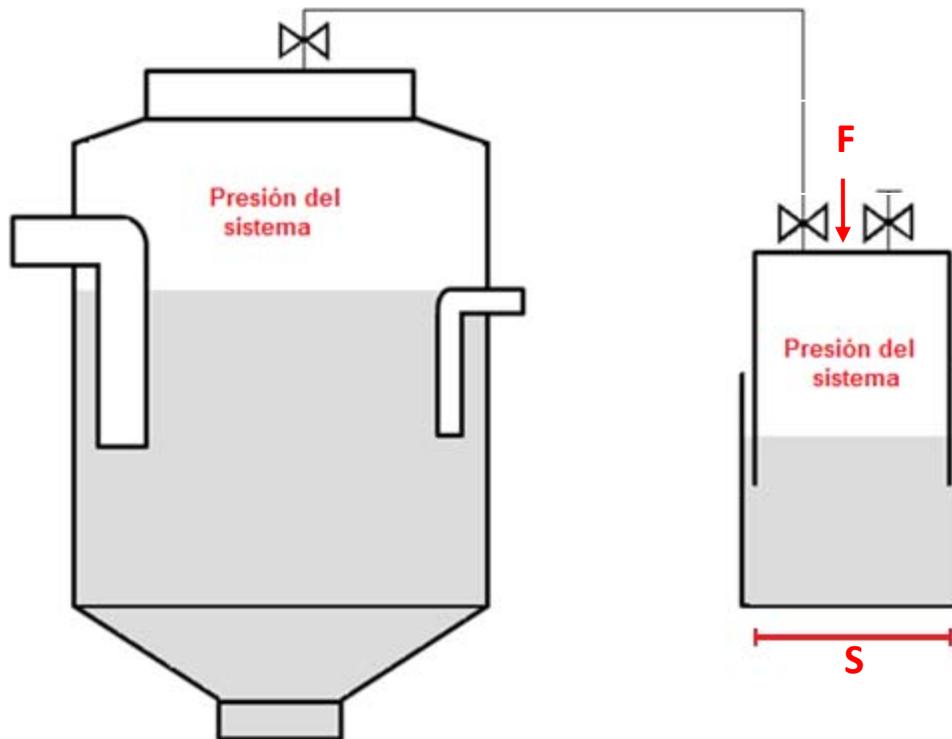


Figura 4. 11: Sistema biodigestor-gasómetro.

Fuente: elaboración propia.

De tal manera, podemos decir que, la presión en el digestor (P_D) y la presión en el gasómetro (P_G), serán las mismas, por lo que, la presión en el sistema (P_S) será igual para sus componentes:

$$P_D = P_G = P_S$$

Donde P_S , estará dada por el peso y la superficie del gasómetro.

Recordemos que, la fuerza que ejerce un gas, un líquido o un sólido sobre una superficie, se le conoce como presión.

$$P_S = \frac{F}{S} \quad \dots (4.10)$$

Donde:

F=Fuerza que ejerce la parte móvil del gasómetro.

S= Superficie o área de la parte móvil del gasómetro.

Tenemos que, la fuerza ejercida por acción del peso del gasómetro es la siguiente:

$$P = m \cdot g$$

Donde:

m=masa de la parte móvil del gasómetro=1kg

g= aceleración de la gravedad=9.8m/s²

$$P = 1kg \cdot 9.8 \frac{m}{s^2}$$

$$P = 9.8kg \frac{m}{s^2} = \mathbf{9.8 N}$$

La fuerza ejercida por acción del peso de la parte móvil del gasómetro es de 9.8 Newton.

La superficie en la que se ejerce la presión es de área circular, de tal forma que, la calculamos de la siguiente forma:

$$S = \pi \cdot r^2$$

Donde:

$$r^2 = \text{radio del gasometro} = 15\text{cm}$$

$$S = \pi \cdot 0.15\text{m}^2 = \mathbf{0.07068\text{m}^2}$$

Tenemos que, la superficie en donde se ejerce la presión es de 0.07068m^2 .

Sustituimos valores de P y S en la ecuación (4.10):

$$P_s = \frac{9.8\text{N}}{0.07068\text{m}^2}$$

$$P_s = 138.653 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \mathbf{138.635\text{Pa} = 1.38653\text{mbar}}$$

De modo que, una vez el sistema se encuentre generando gas, la presión aumentará hasta superar los 1.38653mbar. En este punto, la presión interna y la externa en el gasómetro, pasarán de encontrarse en equilibrio a encontrarse que, la presión interna será mayor que la del peso de la parte móvil del gasómetro y por ende, esta ascenderá.

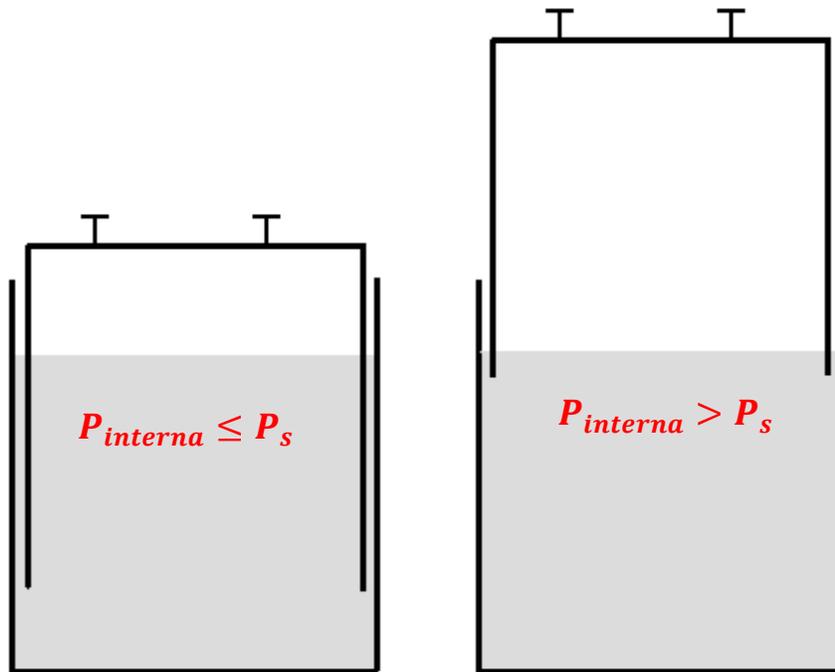


Figura 4. 12: Funcionamiento del gasómetro.

Fuente: elaboración propia.

Podemos decir que:

- Si la presión interna ($P_{interna}$) es menor o igual que la presión con la que trabajará el sistema (P_S), la parte móvil del gasómetro quedará estática, esta no ascenderá.
- Si la presión interna ($P_{interna}$) es mayor que la presión de trabajo (P_S), la parte móvil del gasómetro ascenderá.

Que para la combustión del biogás que se almacene en el gasómetro, tendremos que agregarle peso a esté de modo que se encuentre en los rangos aceptables, que oscilan entre los 8-25 mbar. Si bien, nuestro gasómetro de forma natural nos entrega 1.38653 mbar de presión por un kg que es el peso de la parte móvil de esté.

Podemos decir que, para que nuestro gasómetro nos entregue 15 mbar, necesitamos adicionar cierta cantidad de peso a la parte móvil del gasómetro:

$$P_{combustion} = \frac{1 \text{ kg} \times 15 \text{ mbar}}{1.38653 \text{ mbar}}$$

$$P_{combustion} = 10.8 \text{ kg}$$

Entonces podemos decir que, para que el gasómetro nos entregue 15 mbar en donde la quema del biogás sería aceptable, a la parte móvil del gasómetro se le tendría que adecuar 10 kg de peso, tomando en cuenta que esté de forma natural nos entrega ya un kg, de modo que, adicionando 9 kg extras podríamos llegar a los 15 mbar.

4.10. Problemas de adecuación en biodigestor Rotoplas.

Uno de los principales problemas que se pudo observar en el biodigestor Rotoplas, es la tubería que este contiene, la cual se encuentra en gran medida dentro de la zona en la que se pretende estará el biogás, que es la parte superior del reactor, por lo que cada componente que se encuentre en dicha zona se deberá encontrar en optimas condiciones para así evitar fugas futuras.

- Entrada de afluente: inicialmente la tubería de PVC de 4" se encontraba unida tan solo con un empaque de neopreno, de tal forma que cualquier gas que se generara dentro del reactor podía fugar sin ningún problema. para tal caso se decidió fijar la tubería mediante bridas hidráulicas, las cuales fueron ajustadas a la superficie que se le brindaba a la entrada del afluente.
- Orificios secundarios: de las adaptaciones realizadas en el biodigestor las cuales se mencionaron anteriormente, quedaron algunos orificios sin función alguna, como es el caso de la Tubería PVC de 2" para salida de agua tratada al campo infiltración o pozo de absorción y Tubería PVC de 2" de acceso para limpieza y/o desobstrucción que están dados como los puntos 3 y 5 respectivamente en la ficha técnica del biodigestor.
- tapa: la ficha técnica nos dice que esta es para un cierre hermético, pero al instalarla podemos observar que tanto por su alta flexibilidad así como la poca presión que esta ofrece al estar completamente enroscada al reactor, fue necesario adaptarla con un empaque de neopreno y silicón, de tal modo que se pueda evitar la fuga del biogás por esta unión.

CAPITULO V

ETAPA DE ARRANQUE Y OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR

V.ETAPA DE ARRANQUE Y OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR.

Una vez hechas las adecuaciones pertinentes en el biodigestor Rotoplas para que este trabaje de manera anaeróbica y pueda generar biogás, es necesario que previo a la puesta en marcha del reactor se realicen las pruebas necesarias, para asegurarnos de que este trabajará sin contratiempos.

5.1. Pruebas previas al arranque.

Como ya se dijo, el hacer las pruebas necesarias al biodigestor nos asegurará que este se encontrará en forma para el inicio del proceso y con ello ahorrar tiempo en reparaciones que pudiesen presentarse después.

5.1.1. Prueba hidráulica.

Esta prueba se realizó verificando que no existieran pérdidas de líquido en el biodigestor. Para ello se cargo el reactor con agua hasta llegar al nivel de la salida del efluente, de tal forma que se simulará el funcionamiento normal del reactor.

Una vez lleno hasta su nivel normal, se realizó una inspección visual de todos los sellos de los componentes que se encuentran inmersos en el agua, que posteriormente a la primer revisión se volvió a inspeccionar después de 24 horas, de esta manera nos aseguramos de que el biodigestor no tuviera fugas de líquido.

5.1.2. Prueba neumática.

La prueba neumática consiste en que no existan pérdidas futuras de biogás. Para esta prueba al igual que la hidráulica, el biodigestor debe encontrarse lleno de líquido hasta la salida del efluente, así como el gasómetro debe encontrarse conectado al reactor.

Una vez que el equipo se encuentra conectado y el reactor lleno de líquido, mediante un compresor se inyectó aire al sistema hasta que el gasómetro llegara al límite superior; posteriormente empleamos detergente para hacer jabonadura, la cual se colocó en cada una de las uniones que no se encontraban inmersas en el líquido y se realizó una inspección visual para cerciorarse de que no existieran fugas de gas (formación de burbujas).

5.2. Etapa de arranque.

Una vez conectado el gasómetro al biodigestor y verificada su hermeticidad, se procedió a la puesta en marcha del proceso biológico, agregando un aproximado de 10kg de estiércol fresco de vaca, el cual se cree será suficiente para aportar las bacterias necesarias para la producción del biogás, de tal manera que los 10 kg de residuo se adecuaron para ser suministrados al reactor:

En recipientes limpios de cualquier sustancia que pudiera ser nociva a nuestro proceso (químicos, combustibles,...etc.), se preparó la mezcla, adicionando estiércol de vaca con un poco de agua, sin considerar que esta se encontrara o no al 10%ST, la razón de esta decisión fue debido a que el reactor aún tenía el liquido de las pruebas de hermeticidad, de tal forma que si la mezcla se hubiese llevado al 10%ST, tendríamos que haberlo vaciado a más de la mitad de su capacidad.

Una vez homogeneizada la mezcla dentro de los recipientes, se procedió a remover la materia flotante, así como los restos que fueran de un tamaño considerable, de tal manera que al tener sólo partículas de residuos muy pequeñas esperamos que el proceso sea más rápido, así como también el evitar que las tuberías se llegasen a tapar.

Una vez adecuada la mezcla, esta se incorporó al biodigestor y se mezcló para lograr homogeneizar la mezcla con el agua que se encontraba ya dentro del reactor, posteriormente se le tomo el pH y temperatura, arrojando los siguientes resultados:

Etapa de arranque (carga inicial).

Día	Kg residuo fresco	pH	Temperatura °c
7 de diciembre 2015	10 kg	5	21 °c

En un proceso de carga semi-continuo como es nuestro caso, la producción del biogás se presentara después de un cierto periodo (tiempo de retención) a partir de la carga inicial, que esta en función de la temperatura en la que el fluido se encuentre dentro del biodigestor. Recordemos que el cálculo estimado para la generación del biogás será de aproximadamente 40 días.

Las diferentes etapas que se realizaron para el correcto funcionamiento del biodigestor a partir de la carga inicial fueron las siguientes:

- a) Dejar cerrada la válvula de salida del gas durante unos 5 a 7 días, con el objeto de eliminar todo el oxígeno que será consumido por las bacterias de las primeras fases del proceso de fermentación.
- b) Soltar el gas después de dichos días con la precaución de que al reactor no le entre más oxígeno, repitiendo este proceso de 10 a 15 días de haber iniciado la etapa de arranque, con lo cual eliminaremos los remanentes de oxígeno junto con el dióxido de carbono (CO₂) que se genera durante el proceso de biogás.
- c) Después de los primeros 15 días de la carga inicial, se verifica si el inicio de la producción de biogás existe, mediante la quema de biogás.
- d) Si el gas quema con una llama azulada y de buena consistencia se puede iniciar el uso del biogás e iniciar con la incorporación de la carga diaria de residuos. en caso contrario, se debe eliminar todo el gas y hacer más pruebas una vez exista la presión suficiente.
- e) Si después del tiempo de retención el gas que se genera no se quema, podría existir algún problema con el proceso de fermentación, por lo que se debe verificar que no existan fugas, acidificación de excesiva en el reactor, variaciones bruscas de la temperatura o materiales contaminados con productos químicos que pudieran alterar el proceso de fermentación.

Cabe señalar que durante la espera de formación de biogás, el pH y la temperatura del reactor fueron monitoreadas todos los días siempre al medio día, que dio como resultado los siguientes datos:

Días posteriores a la carga inicial.

Día	pH	Temperatura °c
8 al 18 de diciembre 2015	5-6	21-28.8°c

- A partir del día 9 y 10 se percibió un olor a huevo podrido que perduraría hasta el final de la prueba, el cual es característico de la fermentación metánica.

- La presión dentro del biodigestor nunca fue la suficiente para que en el gasómetro retuviésemos parte de los gases que se generaron.
- Se decidió a volver a cerciorarse de que el gas no se fugase, volviendo a colocar jabonadura en todas las uniones, pero esta vez sin inyectar aire puesto que las bacterias metanogénicas que suponíamos se encontraban dentro, morirían al entrar en contacto con el oxígeno, por ende, esta prueba se realizó al medio día, con la esperanza de que la presión fuese la necesaria para poder observar alguna fuga.
- Al no encontrar fugas se tomo la decisión de dejar que esta trabajase durante las vacaciones administrativas de la FES ARAGON, con la expectativa de que al día lunes 4 de enero del 2016 pudiésemos obtener biogás.
- Del 19 de diciembre del 2015 al 3 de enero del 2016, creemos que el biodigestor trabajo con un pH aproximado de 5 a 6 y con temperaturas similares a los días en que este fue monitoreado.

De regreso de los días inhábiles, se tomó temperatura y pH dando 24.5°C y 5 respectivamente, por lo que se prosiguió a verificar si el gasómetro contenía biogás, cosa que no pudo ser, puesto que la presión tampoco fue la suficiente para elevar el gasómetro.

Al no encontrar indicios de que el biodigestor trabajase de manera correcta se tomo la decisión de inyectar aire para volver a realizar la prueba neumática, con la cual pudimos observar que en la unión de la tapa (sellada con un empaque de neopreno y silicón) existían diversas fugas de gas, las cuales creemos surgieron a partir del deterioro del silicón al encontrarse expuesto al sol, puesto que, este se encontraba agrietado en casi todo el perímetro de la unión entre la tapa y el reactor.

5.2.1. Segunda puesta en marcha.

Después del primer intento fallido en la producción de biogás, se tomo la decisión de desechar la biomasa que el tanque contenía así como de abrirlo para una limpieza general de este, y de sus componentes.

Por otra parte, durante la primera puesta en marcha, se percibió una ligera fuga de gas proveniente del tubo que servía como sello de agua en el mezclador, por lo que también se

tomó la decisión de eliminar en la segunda puesta en marcha este aditamento, considerando que sin él, el biodigestor disminuiría su eficiencia.

Para dar fin a las fugas que se presentaron en la unión de la tapa, se optó por adquirir una nueva y volver a ser sellada con un empaque de neopreno en conjunto de un sellador de poliuretano, el cual debiera de soportar las condiciones de trabajo sin ningún problema. Se dejó que el sellador curara por un lapso de 5 días, que posteriormente a los trabajos de hermeticidad, el biodigestor fue llenado con agua hasta su nivel de trabajo y se le hicieron las pruebas hidráulica y neumática.

El biodigestor al encontrarse nuevamente en condiciones adecuadas, se procedió a la puesta en marcha del proceso biológico, pero esta vez agregando un aproximado de 60 kilogramos de estiércol fresco de vaca y se repitieron los pasos ya mencionados en la primer puesta en marcha.

Una vez más, se procedió a monitorear el pH y la temperatura interna desde el primer día de su puesta en marcha mostrando los valores siguientes:

Días posteriores a la carga inicial.

Día	pH	Temperatura °c
5 de febrero al 16 de marzo 2016	5.5-7	17-27°c

- A partir del tercer día de la puesta en marcha, el gasómetro ascendió considerablemente, dando muestras de que la presión a causa de la biodigestión, estaba elevándose dentro del reactor.
- Pasados cinco días desde su inicio, se purgo el biodigestor para eliminar los remanentes de oxígeno, así como parte del dióxido de carbono: al expulsar el gas producido por la biodigestión del reactor durante sus primeros cinco días, se le practicó un prueba de biogás, mediante la quema de este con un mechero, pero este no produjo combustión, por lo que se supuso que este gas aun era CO₂ y remanentes de oxígeno.
- diariamente se le intentaba quemar al gas recolectado en el gasómetro, pero sin obtener resultados hasta el día 11 de marzo en el cual el biogás prendió de manera

intermitente y con una flama de color anaranjada muy tenue, casi transparente, por lo que se supuso que, esta aún no tenía la mezcla correcta de metano y dióxido de carbono.

- fue a partir del día 16 que la quema de biogás mejoró en sobremanera, pues este se quemaba por mucho más tiempo y el color de la flama comenzaba a verse azul por momentos.

A partir del día 16 de marzo del 2016, se tomó la decisión de comenzar a agregarle desperdicios orgánicos de forma gradual sin llegar a los casi 10 kg diarios, los cuales son los calculados para su punto óptimo, de manera que el biodigestor no se sobrecargara o tuviera problemas de pH.

5.3. Operación diaria y problemas de funcionamiento en el biodigestor.

Como ya se mencionó antes, después de unos días de iniciada la producción de biogás, la flama ya era más estable y el color de ella era en mayor medida de color naranja con un pequeño destello de color azul en el centro, por lo que se cree que la cantidad de dióxido de carbono aún era muy alta. De tal forma que se procedió sólo a agregar desperdicios orgánicos cada tercer día y en baja proporción, aproximadamente 4-5 kg, de tal forma que pudiésemos evitar una sobrecarga o acidificación dentro del biodigestor.

Cabe señalar que todos los desperdicios a agregar al reactor fueron previamente triturados mediante un triturador de comida y respetando la mezcla de agua-residuo estipulada en el capítulo de bases de diseño.

Durante el tiempo de alimentación del biodigestor que fue de un lapso de 27 días, el gasómetro siempre contenía gas, pero de igual manera no quemaba de buena forma. Por otra parte, el gasómetro al ser demasiado pequeño no lograba mantener un volumen considerable de gas y este fugaba al llegar a su máximo nivel, por lo que, al no poder almacenar todo el biogás no se logró saber cuánto biogás se generaba por día.

Para el día 22 de alimentación del biodigestor, este presentó problemas, puesto que el gas recolectado en el gasómetro no encendía de tal forma que, se supuso que, el biodigestor al no tener un mezclador pudiera tener una costra de sólidos en la parte superior y por ende la metanogénesis estaba siendo inhibida, puesto que el pH fue descartado al presentar un

rango neutro. De tal forma que al biodigestor se le siguió agregando desperdicios, suponiendo que el problema era pasajero, de modo que, llegado el día 27 de funcionamiento en donde diario se le agregaba residuos, el biodigestor continuaba si producir biogás, por lo que se tomo la decisión de dejarlo reposar y monitorear que era lo que ocurría en los días posteriores.

Fueron diez días en los cuales diariamente el biodigestor era monitoreado, pero este seguía presentando un pH normal y sin presentar fugas de ningún tipo, puesto que el gasómetro trabajó como días pasados.

Se supuso que al ya no encontrar más biogás, la metanogénesis había terminado debido a problemas en la respiración de las bacterias, problema común en los biodigestores de residuos orgánicos domésticos, puesto que estos tienden a concentrarse en la parte superior del reactor, formando una espuma o nata, de forma que a las bacterias les es imposible sobrevivir.

Uno de los principales problemas durante la carga diaria del biodigestor fue la cantidad de efluente que se obtenía al ser cargado, puesto que los mismos litros de afluente eran los mismos de efluente, este liquido al no tener un lugar de fácil acceso para ser vertido como abono tuvo que ser desechado.

CAPITULO VI

RESULTADOS

VI.RESULTADOS.

En la implementación de todos y cada uno de los componentes que al biodigestor Rotoplas se le adecuaron, los cuales han sido mencionados en los capítulos pasados, se puede aseverar que este ahora trabaja de manera anaerobia. El cual fue monitoreado desde la etapa de arranque, durante el proceso de llenado diario y los días posteriores a su final de la producción de biogás, mostrando resultados satisfactorios en cada etapa de la biodigestión.

6.1. Evaluación de las temperaturas durante la biodigestión.

La temperatura ambiental fue monitoreada por una pequeña estación climatológica, la cual se encontraba en el techo del mismo centro tecnológico; dicha estación nos entregó las temperaturas máximas: entre las 14-16hr., mínimas: entre las 5-7hr., y la promedio durante todo el experimento.

En el caso de la temperatura dentro del biodigestor, esta fue adquirida mediante un termopar tipo K y un sistema de adquisición de datos de la marca Agilent Technologies, dicha temperatura fue tomada a partir de la puesta en marcha hasta el fin en la producción de biogás y siempre en una misma hora, por lo que se cree que la temperatura durante el transcurso del día y de la noche debió de variar pero no de manera considerable, puesto que al comparar la temperatura interna con la externa se pudo observar que la interna siempre era mayor.

Se cree que las reacciones bioquímicas llevadas a cabo dentro del reactor ejercen una cierta regulación en su temperatura, así como también la gran cantidad de líquido que se encuentra, debido a que, al bajar la temperatura ambiente este tarda mucho más tiempo en ceder calor y encontrarse en equilibrio con el medio ambiente. Por lo que se cree que gracias a estas razones las bacterias pudieron sobrevivir en el medio, al no presentar cambios bruscos en la temperatura, principal causa de muerte de las bacterias metanogénicas.

Las temperaturas son de vital importancia en el proceso de la biodigestión, puesto que, a mayor temperatura la reproducción de bacterias es más rápida y por ende la producción de biogás sería mayor. Si bien, las temperaturas oscilaron entre los 17-29°C, no fueron las suficiente para lograr su mayor eficiencia; recordemos que a temperaturas mesofílicas, las

cuales fueron las propuestas para el trabajo de digestión del reactor, el fluido se encuentra entre los 12°C y 35°C, optimizándose el proceso entre los 29°C y los 33°C.

A pesar de que el reactor trabajó en la zona mesofílica, éste no logro alcanzar los rangos óptimos para una mayor producción de biogás, y la caída en las temperaturas a pesar de no ser drásticas si fueron bastante notables con respecto al clima al que era sometido.

Por lo tanto, un sistema de calefacción que contribuya al aumento de la temperatura es de vital importancia y a modo de, evitar usar un aislante térmico, debido a que se cree que el reactor al ser de color negro, la absorción de radiación era bastante buena puesto que, aun a bajas temperaturas atmosféricas o en días nublados, el exterior del reactor se encontraba tibio, y a temperaturas altas y de cielo despejado, el tacto era imposible debido a su alta temperatura.

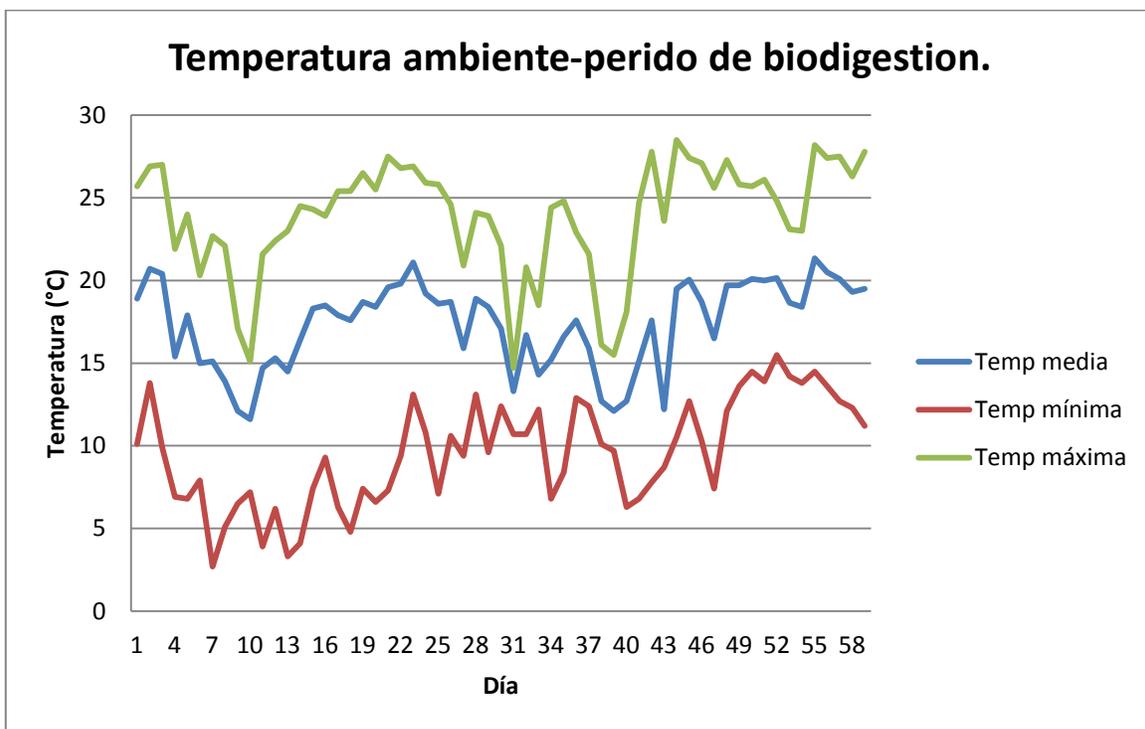


Figura 6. 1. Temperatura ambiente durante la biodigestión

Fuente: elaboración propia.

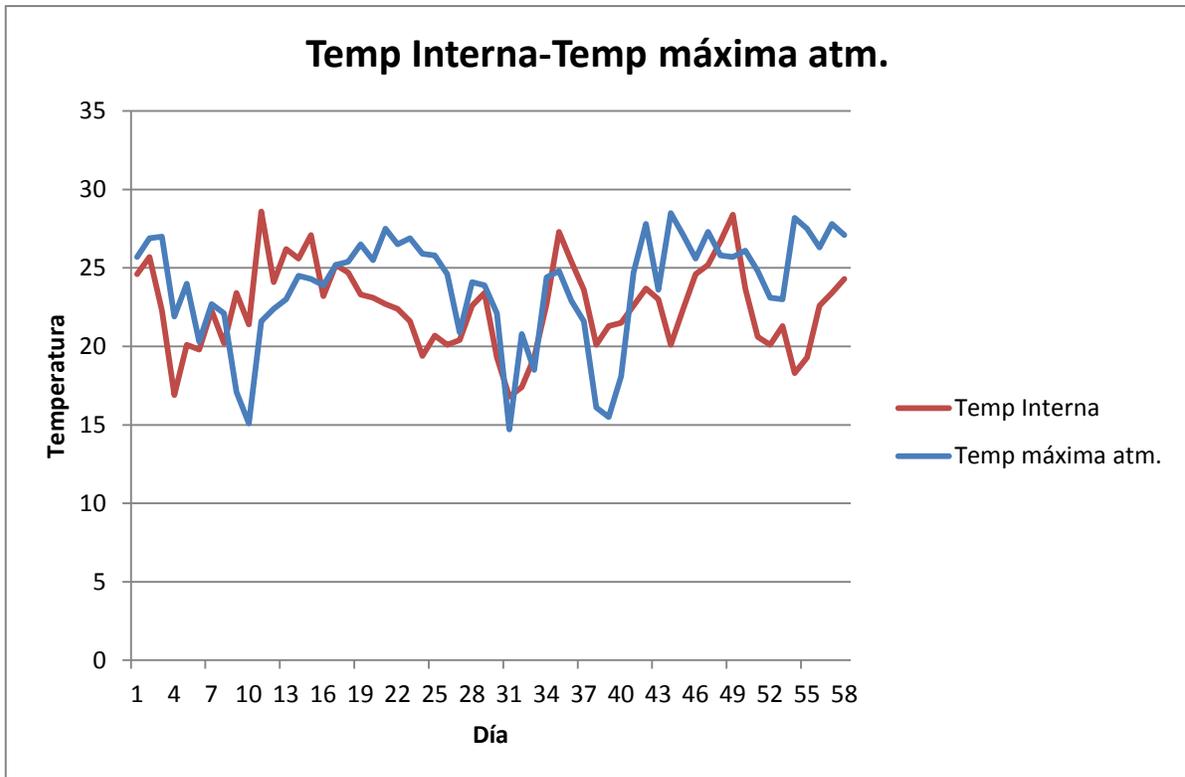


Figura 6. 2. Temperaturas interna y externa del biodigestor.

Fuente: Elaboración propia.

6.2. Evaluación del pH.

El monitoreo del pH en el biodigestor se llevó a cabo desde la puesta en marcha hasta el final de la producción de biogás, este monitoreo fue realizado con papel indicador con un rango de 4.5-9 que marcaba de cinco en cinco unidades. Con ello logramos tener una medición del pH más acertada.

La producción de biogás se dio pasando 40 días de espera donde el pH osciló 5.5-6.5 y a partir de la generación de éste el pH osciló de 6.5-7.5. Estando este potencial de hidrogeno en los rangos aceptables para la metanogénesis. También hay que destacar que, antes de la producción de biogás el pH era demasiado ácido con valores iniciales de 5 que conforme al transcurso de los días fue alcalinizándose hasta llegar a condiciones aceptables.

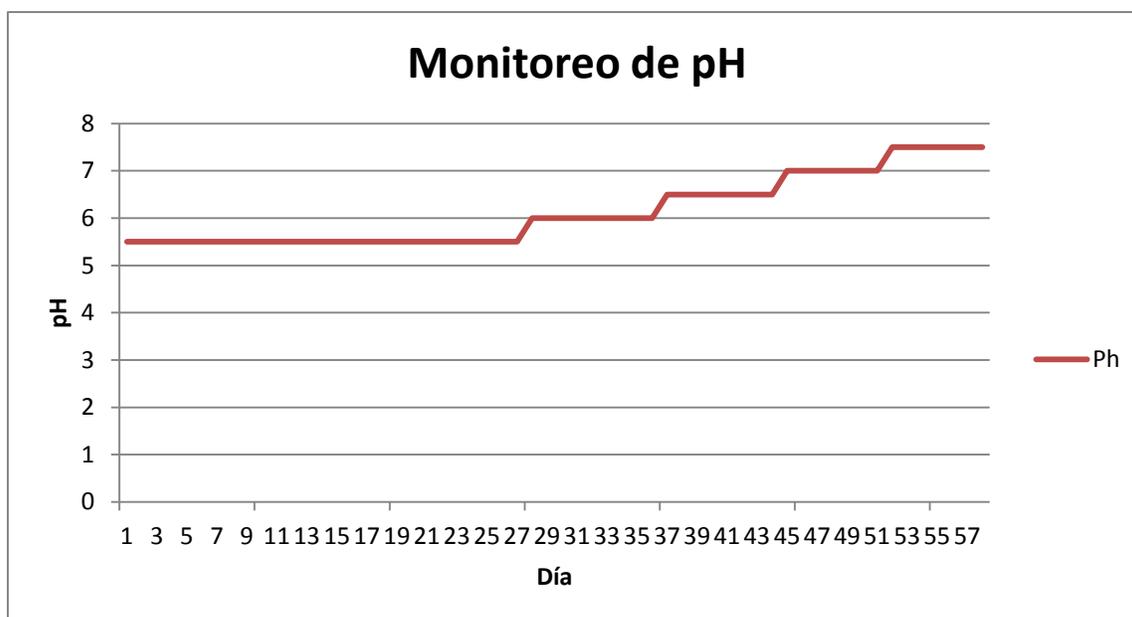


Figura 6. 3. Monitoreo de pH.

Fuente: elaboración propia.

Cabe señalar que, al no contar con un equipo electrónico el cual nos arrojará mediciones más exactas del pH dentro del reactor, la gráfica tiene un aspecto diferente, puesto que el papel indicador a pesar de estar en rangos pequeños no fue lo suficiente para generar datos más exactos.

Por otro lado, podemos observar en la gráfica que, durante los casi 40 días en que el biodigestor no generaba biogás, era debido a las reacciones químicas previas a la metanogénesis (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis), en las que se necesitan rangos de pH menores a 7 para la producción de las bacterias correspondientes a cada proceso, posteriormente a los procesos previos en la generación del biogás se puede observar que el pH aumentó y con ello la metanogénesis comenzó la producción del biogás.

6.3. Estimación de biogás producido.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la producción diaria de biogás no se pudo calcular, puesto que está al no ser liberado una vez que el gasómetro se encontrara en su máximo nivel, no se logró obtener el dato de cuantas veces al día está se llenaba de biogás.

Mas sin en cambio, el volumen de biogás que el gasómetro podía contener era de 0.0212m^3 , y considerando que el gasómetro siempre se encontraba en su máximo nivel a la hora de tomar las mediciones (10.00 am), se especula que quizás el gasómetro pudiese haberse encontrado en su máximo nivel unas cuatro veces por día, lo que daría un valor de 0.0848m^3 de biogás/día.

Considerando que la producción de biogás esperada era de unos 0.36m^3 por día (estando el biodigestor trabajando en óptimas condiciones), la producción real fue tan sólo una cuarta parte de la teórica y que al no contar con un mezclador ni con las condiciones de temperaturas externas adecuadas, la producción de biogás se considera que fue buena.



Figura 6. 4. Gasómetro.

6.4. Estimación del poder calorífico del biogás.

Recordemos que el poder calorífico de un combustible es: “La cantidad de calor producida, o generada, por la combustión completa de la unidad de combustible en cuestión, suponiendo que los productos de la combustión se enfrían hasta la temperatura inicial”, es decir: la cantidad de calor que entrega, ya sea un kilogramo o un metro cubico de combustible al oxidarse completamente.

Para la estimación del poder calorífico del biogás se realizó el calentamiento de 100 ml de agua destilada, llevando un registro en el aumento de la temperatura cada 30 segundos durante 5 minutos. Este proceso fue realizado a temperatura ambiente y a presión atmosférica, mediante un mechero de bunsen para el calentamiento del agua destilada que se encontraba en un vaso de precipitado de 250 ml y las temperaturas por medio de un termómetro de mercurio, el cual fue sumergido en el líquido desde el inicio del experimento.

De modo que con los datos adquiridos del termómetro y la cantidad de biogás que se quemó, podemos utilizar la siguiente fórmula para el cálculo del poder calorífico del biogás:

$$N = \frac{m_a \times \Delta t \times c_p}{G}$$

Donde:

N = poder calorífico

m_a = masa del agua

Δt = diferencia de temperatura del agua

c_p = calor específico

G = volumen del combustible quemado

Calor específico: se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia para elevar su temperatura en una unidad.

Al realizar el método propuesto para la estimación del poder calorífico, los resultados no fueron los esperados, puesto que, al no efectuarse una combustión continua del biogás, el aumento en la temperatura del fluido utilizado fue imposible.

Si bien, esté problema pudo ser causado por diferentes factores, uno de ellos pudo ser la presión de trabajo, puesto que, a pesar de que los cálculos para el ajuste de la presión en el gasómetro fueron correctos, la presión de trabajo del mechero de bunsen es mucho mayor y por ende, al intentar quemarlo con la presión propuesta que era de 15mbar, la combustión era intermitente.

Por lo que, se decidió agrandar el orificio de salida del mechero de bunsen a un diámetro de 1/16 pulgada, con ello se esperaba que la combustión fuera mejor, más sin en cambio, está no mejoró notablemente, puesto que la combustión era ya a lapsos más largos, el color de la flama era en su mayoría incoloro, con tonalidades anaranjadas en las puntas y un pequeño destello azul en el centro. Por lo que se cree que el color de la flama pudo deberse a varias cuestiones:

- la mala combustión del biogás: al no tener una relación correcta de gas-oxigeno, este quemaba de forma incompleta y por ende el color de la llama.
- la composición del biogás: al no tener forma de medir la composición del biogás generado, se puede pensar que la composición del biogás era inadecuada, pues al existir una gran cantidad de dióxido de carbono en el biogás la inflamabilidad de este disminuye y por ende, la tonalidad de la llama, así como el proceso de combustión que era intermitente, pudieron ser derivados de la inadecuada composición del biogás.
- el vapor de agua: el biogás al estar en contacto directo con el agua que evita que este se escape, se cree que al existir altas temperaturas el liquido se condensa y al liberar el biogás para quemarlo, el vapor de agua se encuentra mezclado con esté.

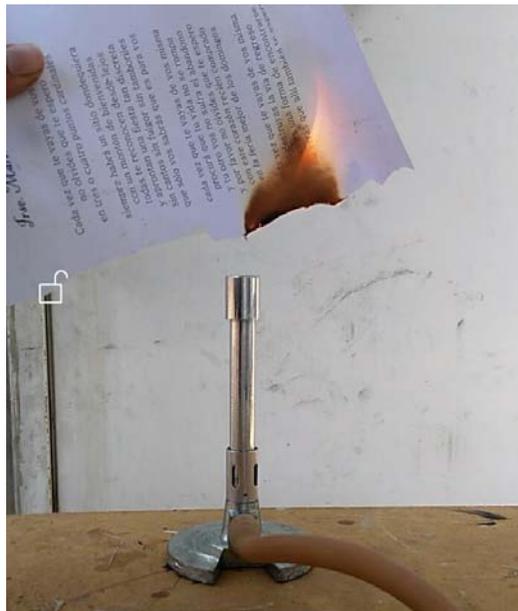


Figura 6. 5. Quema de biogás.

Si bien, la evaluación de la capacidad calorífica del biogás fue imposible de obtener de forma experimental, en la literatura se habla de que este tiene un poder calorífico aproximado de 4-6 KW h m³, a diferencia del gas natural que oscila entre los 12 KW h m³, dependiendo este de su pureza.

El biogás al tener una alta proporción de metano, permite que el biogás pueda ser empleado para reemplazar los combustibles tradicionales, como lo es la leña y el carbón, sin la necesidad de adecuar el biogás, es decir, tal cual como esté es generado es idóneo para su uso en los hogares.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES.

Acorde a los resultados obtenidos conforme a la viabilidad que el biodigestor Rotoplas presentó, al ser este adecuado para la generación de biogás, se llegó a las siguientes conclusiones:

A pesar de que el biodigestor no contaba con algún aislante térmico, la temperatura interna osciló dentro de los parámetros aceptables para permitir una correcta biodigestión.

Si bien, las temperaturas óptimas en el sustrato son de 29-33°C, la temperatura experimental osciló 17-29°C, esto habla de un buen funcionamiento, considerando las bajas temperaturas atmosféricas a las que fue sometido el biodigestor.

Los rangos obtenidos en el muestreo del pH fueron idóneos para cada una de las etapas en el proceso de la biodigestión, considerando que las bacterias metánicas trabajan con un pH de 6.8 y 7.4, admitiendo valores funcionales entre 6.8 y 7.8.

Las adaptaciones en el biodigestor Rotoplas para que este produjese biogás, es decir, hacerlo anaerobio, fueron engorrosas, puesto que éste al no estar destinado para la generación de biogás, presentó demasiadas fugas las cuales tuvieron que ser remediadas antes de su puesta en operación.

Si bien, el biodigestor logró trabajar de forma correcta con las modificaciones que se le implementaron, la tapa de este no era adecuada para obtener un cierre hermético, por lo que, se recomienda utilizar contenedores con tapas de menor tamaño o en su defecto con un cierre hermético.

El mezclador que en un principio fue diseñado con un sello de agua fue fallido, debido a que por la tubería de este se fugaba gran parte del biogás.

Se recomienda tener una alimentación de materia prima cada tercer día como mínimo, con el fin de tener una generación de biogás constante, a fin de tenerlo disponible en cualquier momento.

CONCLUSIONES.

Por otra parte, la generación teórica de biogás es de 0.36m^3 más o menos, en un estado óptimo, de los cuales el biodigestor sólo generó 0.848m^3 , es decir sólo una cuarta parte de lo teórico, por lo que se considera un éxito, al encontrarse este sin mezclador y sin aislantes térmicos.

La eficiencia energética fue un fracaso, puesto que al quemar el biogás este presentó una combustión intermitente, por lo que se plantea como inquietud para una próxima experiencia la evaluación de este por medio de otros procesos.

Se recomienda darle las atenciones necesarias al reactor a modo de evitar fugas o contaminación dentro de este.

A partir del emprendimiento en la generación de biogás, se logró la realización de un manual el cual contribuya al manejo acertado del biodigestor Rotoplas, para con ello en futuras pruebas este sea perfeccionado en cada nuevo intento.

La utilización de Biodigestores anaerobios para el tratamiento de los residuos orgánicos permite procesos sostenibles y sustentables.

El uso de Biodigestores es una opción palpable para el suministro de energía en hogares de bajos recursos, de manera que se mejoren las condiciones de vida.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA.

DE LA MERCED, J. 2012. *Evaluación de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo continuo*. Tesis de maestría. México: Universidad Veracruzana. Recuperado el 5 de junio del 2015, de <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/31560/1/delamercedjimenezdiego.pdf>

HUERGA, I.R.; BUTTI, M.; VENTURELLI, L. 2014. *Biodigestores de pequeña escala: un análisis práctico sobre su factibilidad*. (1ª ed.). Santa Fe: INTA

La FAO.2011. *Manual de biogás*. Chile. Recuperado el 7 de febrero del 2015, de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>.

LINK INDUSTRIAL. 2011. *Agitadores*. España. Recuperado el 10 de abril del 2015, de https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/7932/agitadores_2.pdf.

LOPEZ, C y LOPEZ, S. 2009. *Diseño, construcción y puesta en operación de un biodigestor anaerobio continuo para el laboratorio de ingeniería química de la facultad de ciencias de la universidad Veracruzana*. Tesis de licenciatura. México: Universidad Veracruzana. Recuperado el 18 de febrero del 2015, de <http://cdigital.uv.mx/bitstream/12345678/932/1/LopEZ%20MENDOZA%20CLAUDIA.pdf>.

MERLIN, R. 2010. *Producción de abono orgánico y biogás Mediante biodigestión anaeróbica de lodos Activos*. Tesis de licenciatura. Chile: universidad de la serena. Recuperado el 22 de abril del 2015, de <http://documents.mx/documents/tesis-merlin-rivera.html>.

MONCAYO, G. 2005. *Manejo ecológicamente compatible de las cuencas de Tungurahua; Digestión anaeróbica y diseño de biodigestores*. Ecuador. Recuperado el 26 de marzo del 2015, de <http://www.aqualimpia.com/descargas.htm>.

MOSCOSO, B. 2010. *Potencial de la digestión anaerobia en la unidad de ganado lechero de Zamorano*. Tesis de licenciatura. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana el Zamorano. Recuperado el 3 de mayo del 2015, de <http://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/545>.

RODRIGUEZ, G. *Tanque IMHOFF, Tratamiento de Aguas residuales en Pequeñas Comunidades* (pp.17-30). Recuperado el 28 de junio del 2015, de http://www.academia.edu/9474104/Tratamiento_de_Aguas_residuales_en_Peque%C3%B1as_Comunidades.

SECRETARIA DE ECONOMIA. 2001. *Análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba*. Recuperado el 24 de mayo del 2015, de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-034-SCFI-2001.pdf>.

TORRES, D y ORTEGAS, L. 2009. *Desarrollo de un sistema de biodigestores y energías limpias*. Perú. Recuperado el 8 de marzo del 2015, de <http://compinformatidf.files.wordpress.com/2009/09/trabajofinal080909.pdf>.

ANEXOS

MANUAL DE USUARIO.

Si bien, la memoria de cálculo, las bases de diseño y el manejo del biodigestor desde las pruebas previas hasta la operación diaria, se encuentran ya descritas en los capítulos anteriores, la necesidad de un manual que permita el uso del biodigestor Rotoplas, el cual fue adecuado para la generación de biogás, por cualquier individuo para pruebas futuras sin la necesidad de retomar todos los capítulos, es de suma importancia.

1. Pruebas previas a la puesta en marcha:

Como se ha demostrado, el biodigestor logró trabajar sin fugas, tanto neumáticas como hidráulicas. Pero recordemos que cada vez que el biodigestor entre en funcionamiento, previamente se le deben de realizar dichas pruebas, de modo que, este trabaje sin interrupciones y de manera correcta:

a) Prueba hidráulica:

Para realizar esta prueba, es necesario llenar el tanque hasta su nivel normal, para así simular el funcionamiento de este, de manera que la tubería del afluente y efluente estén inmersas en el líquido. Una vez llenado hasta dicha zona, se debe realizar una inspección visual de todos los sellos de los componentes que se encuentran inmersos en el agua, y posteriormente a la primer inspección volver a realizarlo pasadas 24 hora, de forma que se asegure que no existen fugas de líquido.

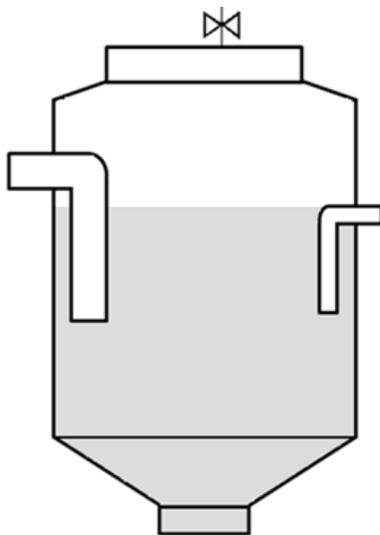


Figura A. 1. Llenado para prueba hidráulica

Fuente: elaboración propia.

b) Prueba neumática:

La prueba neumática consiste en que no existan pérdidas futuras de biogás. Para esta prueba al igual que la hidráulica, el biodigestor debe encontrarse lleno de líquido hasta la salida del efluente, así como el gasómetro debe encontrarse conectado al reactor.

Una vez que se encuentre en dicha zona, cerrar la válvula del efluente así como la de la salida del biogás del gasómetro, y abrir la válvula del gas del biodigestor.

Posteriormente agregar agua por la tubería del afluente, de forma que el gasómetro ascenderá hasta su máximo nivel.

Consecuentemente cerrar la válvula del afluente y agregar 9 kg de peso al gasómetro, de manera que se simule el funcionamiento normal.

Ya realizados estos pasos, agregar jabonadura en todas las tuberías y sellos que no se encuentren inmersos en el agua, tanto del gasómetro como del biodigestor.

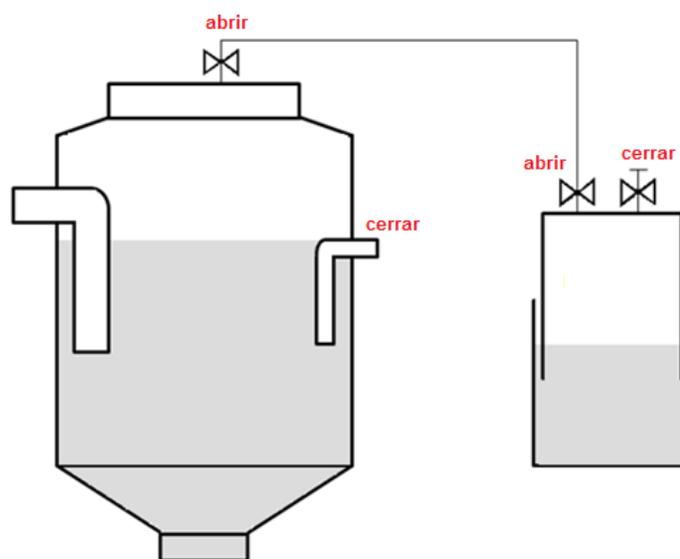


Figura A. 2. Estado de las válvulas para prueba neumática.

Fuente: elaboración propia.

Ya realizadas estas dos pruebas fundamentales para el adecuado funcionamiento de nuestro sistema, podemos entonces pasar a su puesta en marcha, es decir, a agregar el inoculo al reactor.

2. Etapa de arranque:

Recordemos que el cálculo estimado para la generación del biogás será de aproximadamente 40 días y diariamente se le adicionarán casi 10kg de residuos orgánicos y que por otro lado, el porcentaje de sólidos debe encontrarse siempre en un 10% aproximadamente.

De modo que al final de los 40 días habrá unos 400kg de residuo aproximadamente, de tal manera podemos entonces decir que, para la puesta en marcha se deben agregar unos 40 kg (el 10% de los residuos totales) más o menos de residuos de animales, puesto que en las eses de ellos, se encuentran las bacterias necesarias para dar inicio al proceso de biodigestión.

Las diferentes etapas para una correcta puesta en marcha son las siguientes:

- a) **Retiro de agua utilizada en pruebas de filtraciones:** Una vez realizadas las pruebas con agua para comprobar que no existen filtraciones o fugas en el sistema, se debe de retirar parte del agua, dejando aproximadamente 2/3 de la altura del biodigestor. El agua que se deja tienen como finalidad a ayudar a diluir las materias orgánicas, así como contribuir a que el nivel adecuado para el funcionamiento del reactor sea idóneo.
- b) **Preparación de la carga inicial:** Este proceso se caracteriza por el llenado completo del digestor, a través de la tubería del afluente, cabe señalar que a la hora del llenado todas las tuberías deben encontrarse abiertas, de modo que la presión en el sistema no aumente.

En recipientes limpios de cualquier producto químico que pudiese inhibir la biodigestión, se prepara la mezcla. Es necesario incorporar esta carga de residuos de animales diluida con agua. Si bien la proporción debe estar a un 10%, de cálculos anteriores sabemos que por cada 9.49 kg de residuo se le adicionan 7.21 litros de agua, por lo que podemos decir que: por 1kg de residuo se adiciona 0.75 litros de agua.
- c) **Incorporación de la carga inicial:** Antes de introducir la mezcla de agua-residuo, se debe de remover de los recipientes toda la costra (materia fluctuante) que suele

formarse en la superficie, puesto que esta puede contribuir a una deficiencia en el reactor.

Es importante destacar que una vez agregada la mezcla, el nivel del líquido dentro del reactor debe cubrir la tubería del afluente y efluente de manera que se forme un sello de agua a modo de evitar que se introduzca oxígeno y que este no permita la biodigestión anaerobia.

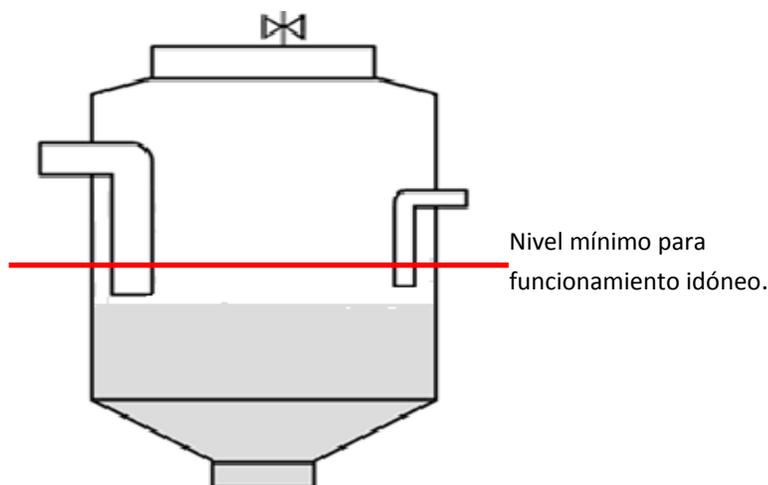


Figura A. 3. Insuficiencia de líquido.

Fuente: elaboración propia.

d) Eliminación de oxígeno y CO₂.

Una vez agregada la mezcla y que el biodigestor tiene un nivel adecuado de líquido, se deben de cerrar las válvulas del afluente, efluente y la salida de gas del gasómetro, de manera que el proceso de la biodigestión comience y este agote el oxígeno que se encuentra dentro del reactor. Al día siguiente se recomienda si es que el nivel del gasómetro ascendió, eliminar este gas resultante de las primeras etapas de la biodigestión. De forma que, se cierra la válvula de gas del biodigestor y posteriormente se abre la válvula de la salida de gas del gasómetro, de manera que se libere el gas sin permitir que vuelva a introducirse más oxígeno al sistema, después de ello es necesario volver a dejar las válvulas como se encontraban. Repetir esta operación hasta completar 15 días, con lo cual se elimina los remanentes de oxígeno y CO₂ generados de las primeras fases del proceso de fermentación, previas a la etapa de formación de metano.

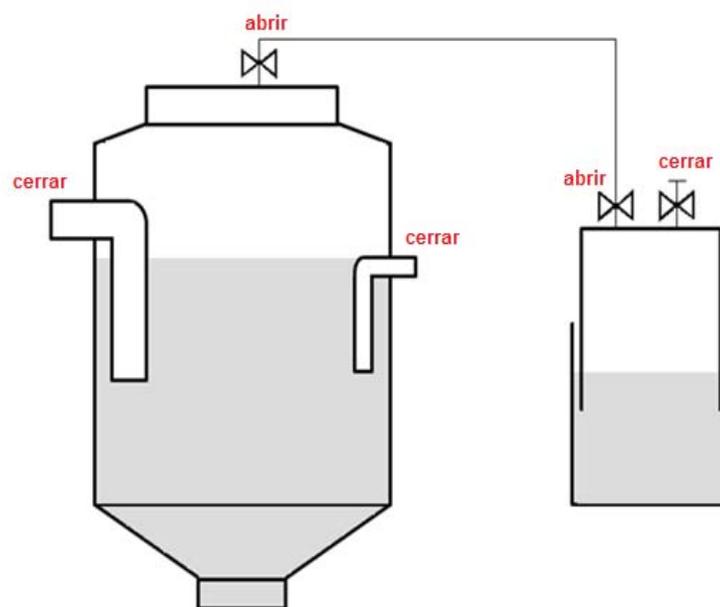


Figura A. 4. Primer paso en la eliminación de oxígeno y CO₂. Estado normal para captación de biogás.

Fuente: elaboración propia.

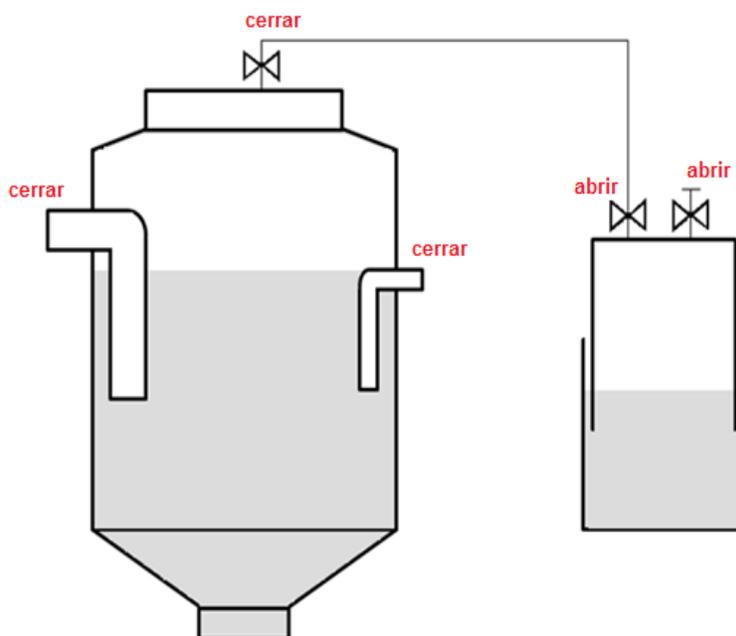


Figura A. 5. Purga de los gases generados, así como para la quema de biogás.

Fuente: elaboración propia.

e) **Prueba de inicio en la producción de biogás:** Transcurridos los 15 días de la carga inicial o etapa de arranque, es necesario comenzar a verificar si ya existe la producción de biogás, mediante la verificación de quema de biogás. Para ello se acopla una manguera a la salida de biogás del gasómetro y utilizando un mechero (el mechero debe de tener una salida de gas mayor que la que comúnmente tiene para que este pueda quemar el biogás) se prueba si este enciende. Si este prende, entonces se puede iniciar el proceso de carga diaria. En caso contrario, esperar hasta los 40 días, que es el tiempo teórico en que el biogás comienza a generarse. Si después de este lapso de tiempo en que se realizaron las pruebas sin dar resultados, puede que exista algún problema en la fermentación. Se debe de verificar que no exista una acidificación excesiva, variaciones bruscas en la temperatura interna, fugas o materiales contaminados que pudieran inhibir la fermentación.

Cabe señalar que, en el transcurso de los días el pH debe de volverse neutro, en caso de pasados los 40 días y el biodigestor presente un pH ácido, es recomendable adicionar 100gr de bicarbonato de calcio diluido en agua cada tercer día hasta que el pH sea neutro.

3. Etapa de operación:

Una vez el biodigestor presente un gas flamable, entonces podemos iniciar la carga diaria de residuos orgánicos.

Carga diaria normal: Recordemos que el biodigestor en su estado normal este tendrá sus válvulas de afluente y efluente cerradas, así como la salida de gas del gasómetro y las válvulas de salida de gas del reactor y la entrada de gas del gasómetro, abiertas.

Dicho esto, se prepara una mezcla de residuos orgánicos, en donde se harán de lado cualquier tipo de desperdicios que sean ácidos (naranjas, guayabas, chiles, fresas...etc.), a modo de evitar una acidificación del biodigestor. Esta mezcla debe de contener un aproximado de 10 kg de residuos por unos 7 litros de agua.

Los residuos orgánicos que se mezclarán con el agua, deben encontrarse los más pequeños posibles, para ello, deben de ser triturados previo a la mezcla con el líquido. Una vez hecho

esto, se retira el material fluctuante de la mezcla y se vierte dentro del reactor. En este proceso, la salida del efluente debe encontrarse abierta, de modo que la misma cantidad de líquido que entra, sea igual a la que sale. Este proceso deberá de repetirse periódicamente a modo que el biogás sea constante y no más de cuarenta veces, debido a que en ese punto, el biodigestor llegara a su máximo nivel de residuos.

Cabe señalar, que todo el líquido que se obtenga del efluente, al ser cargado el biodigestor, puede ser aprovechado como abono, puesto que en la literatura se habla de que este líquido ya es inocuo y apto para nutrir la tierra.

Transcurridas unas horas y a una temperatura alta, el gasómetro ascenderá, dando muestra de que se ha recolectado biogás. Cabe señalar que al existir muy bajas temperaturas la captación de gas será muy poca o nula, debido a que el gas al encontrarse a baja temperatura, este tiende a comprimirse.

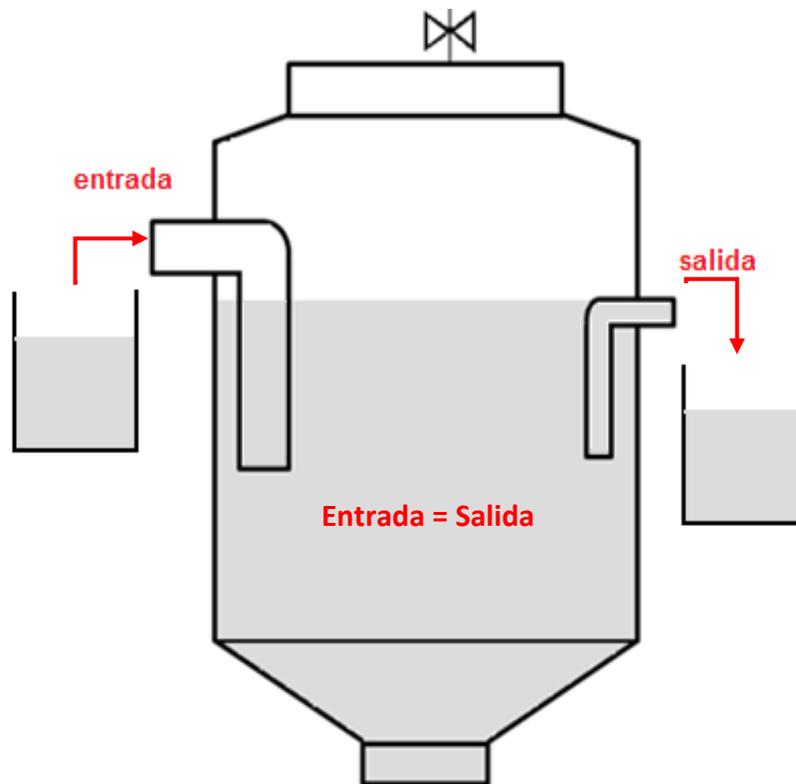


Figura A. 6. Esquema de carga diaria.

Fuente: elaboración propia.

4. Mantenimiento.

Periódicamente se debe inspeccionar si existen fugas de agua o biogás en el sistema, para proceder a su reparación. En el caso del biodigestor Rotoplas, se debe vaciar mínimo a la mitad de su capacidad cada que este llegue a su máxima concentración de lodos (una vez en su nivel máximo de residuos, dejar que el biodigestor trabaje por lo menos 20 días, en los cuales, se permitirá que este digiera todos los residuos y posteriormente poder evacuar la materia ya procesada), permitiendo que se le vuelva a introducir residuos orgánicos y por ende la producción de biogás sea continua. Y por lo menos una vez al año, se debe de vaciar completamente el reactor, retirando el lodo del fondo. Esto permite realizar lo siguiente:

1. Tratamiento de fugas: si bien, las fugas más comunes son las de gas, para ello es necesario una vez detectada la zona por donde este se escapa, limpiar con detergente y agua, para dejar la zona libre de grasa o suciedad, agregar sellador de poliuretano en la zona afectada y dejar que cure por lo menos dos días, en los cuales el biodigestor debe estar seco y libre de humedad.
2. Cuando no se encuentren fugas tanto de líquido como de gas, se debe lavar la cámara de fermentación con abundante agua, cerciorándose de no utilizar jabón, que posteriormente, este pudiese inhibir la generación de biogás.
3. Si las válvulas se encuentran deterioradas, se sugiere que estas sean remplazadas en esta etapa, puesto que al ser cambiadas durante el proceso de fermentación, se corre el riesgo de detener la biodigestión.
4. Se debe revisar frecuentemente las conexiones de las mangueras para asegurar que no se filtre ni fugue líquidos ni gas
5. Después del trabajo diario, se debe lavar los contenedores en donde se prepara la mezcla de los residuos con agua limpia.