

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología

Unidad Académica de Valle de las Palmas



Estudio y dimensionamiento de un biodigestor anaeróbico experimental por el método de demanda de biogás.

Tesis profesional para obtener el título de Ingeniero en Energías Renovables.

Presenta:

Héctor Alberto Jacobi Palomares

Director de Tesis:

Dra. María Cristina Castañón Bautista

Co-Director:

M.I. Eric Efrén Villanueva Vega

Tijuana, B. C., Abril de 2016

Agradecimientos

A mis padres, hermanos, toda mi familia y amigos que siempre están apoyándome en cualquier situación en la que me encuentre. Agradezco a mis maestros Dra. Cristina Castañón y Maestro Eric Villanueva que me guiaron durante la realización de este documento. También, a todas las personas que me motivaron y que creyeron en mi trabajo. Le agradezco su apoyo al Ing. Enrique Mares y Luis Manuel Serrano.

CONTENIDO

1	<i>Introducción</i>	1
1.1	Objetivo	2
1.2	Antecedentes	3
1.3	Problemática ambiental actual respecto a estiércol bovino en Baja California	4
2	<i>Digestión anaeróbica</i>	7
2.1	Características de la biomasa para fermentación anaeróbica	11
2.1.1	Relación carbono/nitrógeno (C/N)	13
2.1.2	Concentración de la materia orgánica a degradar.....	16
2.1.3	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	19
2.1.4	Promotores e Inhibidores de la digestión anaeróbica.	20
2.2	Factores físicos y químicos a considerar para la digestión anaeróbica	22
2.2.1	Temperatura de operación	22
2.2.2	Tiempo de retención hidráulica o de fermentación	26
2.2.3	Rangos de pH.....	27
2.2.4	Agitación	28
3	<i>Biodigestores</i>	31
3.1	Partes de un biodigestor	31
3.2	Clasificación de los biodigestores	32
3.2.1	Continuos.....	32
3.2.2	Semi-continuos	33
3.2.3	Discontinuos o por lotes	34
3.3	Tipos de biodigestores	35
3.3.1	Instalaciones industriales.....	35
3.3.2	Biodigestor de domo flotante	36
3.3.3	Biodigestor de domo fijo	37
3.3.4	Biodigestor tipo “Batch”	38
3.3.5	Reactores de flujo ascendente o descendente	39
3.3.5.1	Reactor de flujo ascendente con filtro anaeróbico	39
3.3.5.2	Reactor de capa de lodo granular (UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket)	40
3.3.6	Biodigestores de estructuras flexibles plásticas.....	41
4	<i>Productos de la digestión anaeróbica</i>	43
4.1	Biogás	43
4.1.1	Purificación.....	46
4.1.2	Almacenamiento	48
4.1.3	Usos	50

4.2	Biofertilizante “Biol”	52
5	Estado del arte	53
5.1	Usos en el mundo	53
5.1.1	China.....	54
5.1.2	Estados Unidos.	55
5.1.3	Austria.	56
5.1.4	Costa Rica.....	56
5.1.5	México.....	58
6	Metodología	60
6.1	Ubicación	61
6.2	Memoria de cálculo: Método de dimensionamiento por demanda de biogás	62
6.2.1	Cálculo de demanda de biogás	63
6.2.2	Cantidad de materia prima requerida.....	64
6.2.3	Concentración de la carga diaria	65
6.2.4	Volumen del biodigestor	66
6.2.5	Volumen del tanque de almacenamiento.....	68
6.2.6	Calculo de presión en el tanque de abastecimiento	69
6.2.7	Producción de biofertilizante.....	75
6.3	Construcción: Materiales y Costos	76
6.3.1	Cámara de digestión	77
6.3.2	Tubería de conducción y almacenamiento	78
6.3.3	Análisis económico.....	81
7	Conclusiones	84
8	Referencias	87

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Fotografía de acumulación de estiércol, puntos de contaminación y sus emisiones en cerros cercanos a establos lecheros de Valle de las Palmas, B. C.	6
Ilustración 2. Etapas del proceso de digestión anaeróbica (VERJEL & PEÑARETE, 2010)	9
Ilustración 3. Gráfica de la tendencia del efecto de la temperatura y tiempo de retención sobre la producción de biogás. (GUEVARA V, 1996).	23
Ilustración 4. Gráfica de la producción de biogás a distintas temperaturas, resultados de varios autores. (HILBERT, 2003).	24
Ilustración 5. Calentador solar para una planta de biogás en Afganistán. (MEARS & ANDERSON, 2011)	26
Ilustración 6. Algunos tipos de sistemas de agitación. A: Agitador de palas horizontal. B: Agitador de palas vertical. C: Agitador de propela ajustable. D: Agitador de propela con manivela. E: Agitador hidráulico. F: Agitadores por medio de aire. (WELLINGER, 1999).....	30
Ilustración 7. Esquema ejemplo de una instalación industrial de un sistema de biodigestor anaeróbico. (SPD, 2011)	35
Ilustración 8. Biodigestor de domo flotante. (PEREZ, 2010).....	36
Ilustración 9. Biodigestor de domo fijo. (PEREZ, 2010)	37
Ilustración 10. Biodigestor tipo “Batch”. (GUEVARA V, 1996).....	38
Ilustración 11. Reactores con filtro anaeróbico. A) De flujo ascendente. B) De flujo descendente. C) De alimentación múltiple. Fuente: (VARNERO M, 2011)	40
Ilustración 12. Biodigestor UASB. (MENDEZ, CHAN, CASTILLO, VAZQUEZ, & ESPADAS, 2012)	41
Ilustración 13. Biodigestor de bolsa de polietileno (HERRERO, 2008).	42
Ilustración 14. Silicato de silicio “Sílica Gel” (WIKIPEDIA, 2015).	47
Ilustración 15. Rebabas de acero que contiene los filtros de Ácido sulfhídrico.	47
Ilustración 16. Gasómetro plástico conectado a un blower. (CERTIC Energia, 2015).	49
Ilustración 17. Usos del biogás.	50
Ilustración 18. Gráfica de numero de biodigestores anaeróbicos operando en algunos países europeos. (Fuente: Center for climate and energy solutions: Country Report of Member Countries, Istanbul, April 2011. IEA Bioenergy)	54
Ilustración 19. Sistema centralizado de producción de biogás: Beijing Distrito de Fangshan, Aldea de Doudian. (DE LA GUERRA, 2011).....	55
Ilustración 20. Planta de tratamiento de residuos orgánicos de restaurantes en Austria. (MONCAYO, 2011).	56
Ilustración 21. Biodigestores tubulares de polietileno conectados en serie, Costa Rica. (HOJNACKI, LI, KIM, MARKGRAF, & PIERSON, 2011).....	57
Ilustración 22. Biodigestor, Proyecto de BIOGEMEX en Joane, León, Guanajuato. (BIOGEMEX, 2015).....	59
Ilustración 23. Ubicación: Valle de las Palmas, Tijuana B.C.	61
Ilustración 24. Esquema ejemplo del tanque de almacenamiento (En color cafe el peso añadido para ejercer presion por gravedad).....	69

Ilustración 25. Cortes de zanja para biodigestor	76
Ilustración 26. Estructura de protección de biodigestor de polietileno (Fotografía del proyecto en construcción).....	78
Ilustración 27. Dibujo ejemplo de vista en planta del sistema biodigestor y sus componentes. ..	80

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Proyección de emisiones GEI en Baja California 1990 – 2025 (ANAYA, et al., 2010)..	5
Tabla 2. Reacciones Bioquímicas en la digestión anaeróbica de la materia orgánica. (ZINDER, 1998)	10
Tabla 3. Residuos orgánicos de origen diverso.	12
Tabla 4. Elementos en el estiércol bovino fresco y biodigerido. (CASTILLO, 2009)	13
Tabla 5. Valores promedio aproximados de la relación C/N de residuos orgánicos (VARNERO & ARELLANO, 1990).....	15
Tabla 6. Análisis de resultados de sólidos totales y volátiles de diversos sustratos orgánicos, efectuados por el Instituto Industrial de Microbiología de Shanghai (GUEVARA V, 1996).	17
Tabla 7. Valores en porcentajes de sólidos totales y sólidos volátiles (OLAYA & GONZALEZ, 2009)	18
Tabla 8. Clasificación de sustratos para la Digestión Anaeróbica (VARNERO M, 2011).	20
Tabla 9. Concentración inhibidora de sustancias (VARNERO M, 2011) y (TAMAYO, 2009)..	21
Tabla 10. Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica (VARNERO M, 2011).	24
Tabla 11. Biogás producido a distintas temperaturas usando estiércol fresco de ganado bovino. (CASTILLO, 2009).....	25
Tabla 12. Comportamiento de la carga de fermentación dentro del biodigestor, de acuerdo con el valor del pH (OLAYA & GONZALEZ, 2009).	28
Tabla 13. Composición química aproximada del biogás (OLAYA & GONZALEZ, 2009).	43
Tabla 14. Características del biogás comparado con otros combustibles gaseosos (VARNERO M, 2011).....	44
Tabla 15. Equivalencia de biogás respecto a otros combustibles (CASTILLO, 2009)	45
Tabla 16. Componentes del biogás y sus efectos. (PEREZ, 2010).....	46
Tabla 17. Clasificación de los gasómetros respecto a su presión de operación. (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008).....	49
Tabla 18. Consumo de biogás aproximado y sus características (6.4 kWh/m ³) (DE LA CRUZ, 2009).	51
Tabla 19. Parámetros de diseño del biodigestor experimental.	62
Tabla 20. Dimensiones de la zanja	77
Tabla 21. Costos de materiales del biodigestor.	82

DEFINICIONES

Aeróbico: Ambiente en el cual un microorganismo necesita del aire u oxígeno molecular libre para subsistir.

Afluente: Flujo de entrada de sustrato al biodigestor.

Anaeróbico: Ambiente en donde un microorganismo puede vivir y desarrollarse en ausencia completa o casi completa de oxígeno molecular libre.

Arqueas: Organismos unicelulares carentes de núcleo.

Bacterias Metanotróficas: Bacterias que consumen metano para subsistir.

Biodigestor: Es un contenedor cerrado, hermético e impermeable dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar en determinada dilución de agua para que a través de la fermentación anaeróbica se produzca gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio, y además, se disminuya el potencial contaminante de los excrementos.

Biogás: Gas metano que se origina por la acción de bacterias sobre sustancias orgánicas.

Biomasa: Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, es utilizable como fuente de energía.

Catabolismo: Conjunto de procesos metabólicos que transforman las grandes moléculas orgánicas en moléculas pequeñas, liberándose energía.

Degradación: En bioquímica, se refiere a Catabolismo.

Digestión: Conjunto de procesos que transforman los alimentos en sustancias más simples, asimilables por el organismo.

Efluente: Flujo de salida del sustrato fermentado en el biodigestor.

Fermentación: Proceso químico por el que se forman los alcoholes y ácidos orgánicos a partir de los azúcares por medio de los fermentos.

Gasómetro: Volumen en el cual se almacena el gas producido por la digestión anaeróbica para después suministrarlo.

Hidrólisis: Descomposición de sustancias orgánicas e inorgánicas complejas en otras más sencillas por acción del agua.

Inoculación: Introducción de una sustancia en un organismo.

Metabolismo: Es el conjunto de reacciones bioquímicas y procesos físico-químicos que ocurren en una célula y en el organismo.

Metanogénesis: Formación de metano ocasionado por metabolismo de microorganismos.

Oxidación: La oxidación ocurre cuando un átomo inestable pierde un electrón, lo que permite que el átomo forme un compuesto nuevo con otro elemento.

pH (Potencial Hidrógeno): Símbolo convencional que expresa el número de iones de hidrógeno libres o acidez, entre 1 y 14, en una solución.

Reactor: Cámara en la cual ocurren reacciones y sus productos.

Siloxenos: Grupo de compuestos que contienen silicio, oxígeno e hidrógeno. Se polimerizan con facilidad dando siliconas.

Sustrato: En bioquímica, molécula sobre la que actúa una enzima. Es la cantidad de materia que produce cierta cantidad de biogás mediante un proceso biológico.

RESUMEN

La energía contenida en la biomasa (residuos orgánicos) y su aprovechamiento es casi desconocido para la mayoría de las personas, ya que llega un momento en donde en la práctica diaria del manejo de residuos orgánicos que derivan de otros procesos, no es de interés económico, sino que son considerados un desecho, donde su disposición final tiene lugar en tiraderos y rellenos sanitarios, sin obtener algún beneficio y que al final solo termina contaminando el suelo, el aire, y a su paso afectando directamente a la salud de la población humana.

Es aquí donde surge la necesidad de evaluar la cantidad de energía que aún contiene esa biomasa residual y de demostrar que mediante tecnologías limpias como en este caso hablando de biodigestores anaeróbicos, se puede llegar a producir un beneficio económico, ambiental y energético con un residuo que se consideraba un desecho y no tendría uso alguno.

En este documento se presenta la metodología de dimensionamiento de un biodigestor mediante una investigación que explica los factores que se involucran en el aprovechamiento de los residuos orgánicos a través de la digestión anaeróbica y la producción de biogás que se obtiene con esta digestión. Estos factores, determinan que tan eficiente es el proceso para producir biogás y biofertilizante. También, se explican los distintos tipos de biodigestores que se utilizan en el mundo.

Se analiza el potencial energético de combustión que contiene el biogás producido, y de las formas que se podría utilizar; por ejemplo, como energía térmica, producir electricidad, etc., y de los tratamientos necesarios del biogás antes de su aplicación.

Se realiza un dimensionamiento para un biodigestor experimental de bolsa flexible plástica en el área de Valle de las Palmas, Tijuana B.C, que pretende demostrar y convencer mediante el estudio de la tecnología, que los biodigestores anaeróbicos son una buena práctica para aprovechar, tratar y disponer adecuadamente de los residuos orgánicos. En cuanto a la tecnología propuesta se estima que es una buena inversión en el aspecto económico y ambiental.

1 Introducción.

La disponibilidad de energía es determinante para mantener y mejorar la productividad de todos los países del mundo. Sin embargo, en la actualidad la demanda de energía se ha incrementado debido al crecimiento poblacional acelerado, sobreexplotación de recursos y tecnologías que demandan electricidad.

Los altos costos de generación de energía eléctrica utilizando combustibles fósiles, la contaminación ambiental por su uso en el mundo, sumado al costo que involucra su obtención y considerando que la disponibilidad de estos combustibles en el futuro sea incierta, hace que surja la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías que solucionen una problemática ambiental y que utilicen energías renovables para generación de energía eléctrica y/o energía calorífica. Algunas de estas tecnologías son las que aprovechan la energía solar tanto térmica como fotovoltaica, energía eólica, energía mareomotriz y undimotriz en los océanos, así como la energía contenida en la biomasa residual y la energía geotérmica.

Con este tipo de proyectos se obtiene una mejora en la calidad de vida de las poblaciones, además de una atenuación al impacto negativo en el medio ambiente, producto del uso de las energías que se consideran no renovables y combustibles fósiles.

El aprovechamiento del valor energético de los residuos orgánicos urbanos, rurales y agropecuarios mediante una fermentación controlada sin oxígeno es uno de los beneficios que actualmente está tomando gran importancia en muchas partes del mundo, ya que con esto es posible aprovechar la materia orgánica hasta su último nivel de residuo.

Con el hecho de no disponer de forma correcta o utilizar estos desechos orgánicos en alguna aplicación benéfica, seguirán dañando fuertemente al ambiente contaminando suelos y cuerpos de agua, proliferación de fauna nociva (insectos, aves, mamíferos) y su transmisión de enfermedades (peste bubónica, tifus murino, salmonelosis, cólera, dengue, entre otras), además de generación de gases efecto invernadero (metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O)) (SEMARNAT, 2013).

Un biodigestor anaeróbico es un depósito cerrado (llamado “reactor digestivo”) al que se le introduce materia orgánica con el fin de fermentarla y degradarla en un ambiente sin oxígeno. En consecuencia, se produce un biocombustible gaseoso llamado “biogás” compuesto principalmente por metano y otros gases. La materia que ya ha sido degradada por el proceso de fermentación es rica en nutrientes para utilizarse como fertilizante.

Uno de los beneficios importantes de este tipo de proyectos es el de obtener un biocombustible (biogás) que proporcione suficiente energía térmica para sistemas de calefacción, cocción de alimentos, generación de electricidad, calentadores de agua, entre otros sistemas que se pueden acoplar al biodigestor para aprovechamiento del biogás.

Una vez obtenido este biocombustible por medio de la fermentación controlada, como consecuencia se obtiene una mejora en la calidad del aire y de suelos, ya que gran cantidad de industrias se encuentran generando cantidades considerables de residuos orgánicos, donde su disposición final es amontonándolos, o quemándolos como en el caso de los establos lecheros, o en rellenos sanitarios.

Con este tipo de proyectos se intenta obtener un beneficio con los residuos orgánicos y lograr mejorar el medio ambiente, además de que funcione como un proceso de lo más sustentable posible.

La generación y uso de biogás como fuente de energía renovable, es una opción con garantía de rentabilidad y beneficios, pues no solo resuelve la problemática ambiental de las emisiones de residuos desmedidas, sino que también permite a la industria un ahorro económico al volverse auto-sustentables en energía eléctrica y/o calorífica.

1.1 Objetivo

Estudiar la tecnología de biodigestores anaeróbicos, para realizar un dimensionamiento de un sistema biodigestor experimental y analizar sus beneficios energéticos, económicos y ambientales. Para el dimensionamiento se emplearán condiciones ambientales del área Valle de las Palmas, Tijuana B.C.

1.2 Antecedentes

El proceso de los biodigestores anaeróbicos en realidad ha sido conocido y aplicado desde la antigüedad. Se utilizaba para el curtido de cueros, para la obtención de etanol, metano, ácidos orgánicos entre otras aplicaciones.

En 1884 Louis Pasteur y su discípulo Gayón concluyeron que la fermentación de estiércol tendría un buen potencial para ser una fuente de energía para calefacción e iluminación, (MEDINA, 1984), sin tomar en cuenta el impacto ambiental del metano que se tiraba libremente en los campos de ganado, pues el estiércol fermentado parecía tener un beneficio considerable.

El primer biodigestor se construyó en el año de 1890 en Bombai, India. El gas producido lo utilizó Charles James para hacer funcionar un motor, y poco después en 1896 en Exeter, Inglaterra las lámparas de alumbrado público eran alimentadas por el gas recolectado de digestores que fermentaban lodos cloacales de la ciudad (CRUZ G, 2015) .

En Alemania por los años de 1920 – 1923 se empezó a utilizar el biogás, para satisfacer las demandas de energía. Años más tarde en Inglaterra por 1927 se empezó a impulsar el uso del biogás y un sistema de biodigestor que consistía en estructura hueca de concreto (GUEVARA V, 1996).

En India para el año de 1939 se inauguró una unidad experimental para el estudio y el diseño de sistemas que requerían la utilización del gas generado en el biodigestor. En China e India para el año de 1986 esta tecnología creció mucho en el sector campesino y ganadero, teniendo más de 7.5 millones de digestores construidos y funcionando. (TAYLHARDAT, 1986).

Cuesta trabajo entender que la aplicación de biodigestores en el mundo data de tiempos muy remotos y que sus beneficios en las aplicaciones respecto a la generación de biogás (tanto como para mitigar impactos ambientales), ya habían sido observados. Sin embargo en algunos países del mundo es una tecnología que apenas se está estudiando y aplicando.

1.3 Problemática ambiental actual respecto a estiércol bovino en Baja California

Estadísticas del INEGI en la Encuesta Nacional Agropecuaria del 2012, en Baja California nos indican que se tienen 38,278 cabezas de ganado aproximadamente que solo se utilizan para la producción de leche.

Cada vaca produce aproximadamente 40 - 50 kg estiércol/día (WEISS & NORMAND, 2009). Tomando en cuenta que cada vaca produce 50 kg de estiércol al día aproximadamente, el estiércol generado por las cuencas lecheras en el estado es de gran interés, ya que anualmente podrían producir 698,573.5 Toneladas de estiércol al año y que solo un pequeño porcentaje se utiliza para fertilizantes. Por otro lado, este desecho puede utilizarse como materia prima en la implementación de biodigestores en el estado.

La gran mayoría de los desechos tienen su disposición final en espacios abiertos donde es quemado, liberando CH_4 , N_2O , CO_2 a la atmósfera, considerados gases de efecto invernadero (GEI) contribuyendo al calentamiento progresivo del planeta, contaminando sin obtener un beneficio ambiental-económico con esta actividad. Las emisiones de CH_4 y N_2O se producen por la descomposición y quema de amontonamientos de estiércol al aire libre (ANAYA, et al., 2010).

Se define que, CO_2e es la concentración de CO_2 que causaría el mismo nivel de la diferencia de radiación solar absorbida por la tierra y la energía reflejada hacia el espacio, relacionado con un tipo de gas efecto invernadero como el metano y el óxido nitroso en este caso.

La proyección para el 2015 del manejo de estiércol (**Tabla 1**) (0.008 millones de toneladas métricas de CO_2) en comparación con los gases proveniente del estómago de ganado bovino (fermentación entérica: 0.34 millones de toneladas métricas de CO_2) es casi insignificante, pero esto no quiere decir que no se encuentre contribuyendo a las emisiones de gases efecto invernadero.

Tabla 1. Proyección de emisiones GEI en Baja California 1990 – 2025 (ANAYA, et al., 2010).

Sector fuente	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Fermentación entérica	0.22	0.24	0.26	0.28	0.31	0.34	0.38	0.42
Manejo del estiércol	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008	0.008	0.009	0.0010
Suelos agrícolas	0.20	0.18	0.21	0.20	0.21	0.23	0.24	0.25
Total	0.43	0.43	0.47	0.49	0.53	0.58	0.63	0.68

*en Millones de Toneladas Métricas Equivalentes de CO₂ (MtmCO₂e)

Solo en el año 2015 se estiman emisiones de 0.008 Millones de toneladas métricas equivalentes de CO₂, y podemos observar que la tendencia de la proyección nos indica que va en aumento en, lo que lleva a pensar que la contaminación seguirá si no se hace nada para cambiarlo.

Las prácticas inadecuadas en el manejo del estiércol se pueden ver en los establos cercanos a la ubicación del biodigestor experimental que se dimensiona en este documento en el área de Valle de las Palmas, donde amontonan el estiércol y lo queman (**Ilustración 1**).

Lo más perjudicial en el manejo inadecuado del estiércol es que puede contaminar cuerpos de agua, suelos y el aire, haciendo que la población cercana a establos se encuentre expuesta a condiciones que afectan a la salud humana (SEMARNAT, 2013).

Los biodigestores son una buena opción para disponer correctamente de los residuos orgánicos que se generan en la industria lechera y en granjas, mitigando a su paso los impactos negativos en la salud humana de las personas que viven cerca de estas instalaciones ya que como se considera una zona de fuertes vientos, el viento arrastra lo que contienen amontonamientos de estiércol que se pueden considerar como focos de infección y contaminación.

Los sistemas de digestión anaeróbica que posteriormente se explican en este documento nos indican que es posible la descontaminación y que trae consigo muchos beneficios, no solo ambientales sino económicos.



Ilustración 1. Fotografía de acumulación de estiércol, puntos de contaminación y sus emisiones en cerros cercanos a establos lecheros de Valle de las Palmas, B. C.

2 Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso biológico degradativo, en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato (residuos orgánicos) son degradados y por consiguiente, se obtiene como producto un biocombustible que se le conoce como biogás (mezcla de dióxido de carbono y metano junto con otros elementos).

La materia es degradada por varios tipos de bacterias completamente inhibidas por el oxígeno dentro del biodigestor. En la transformación de materia orgánica compleja hasta la producción de biogás, intervienen estos microorganismos que forman una cadena trófica compleja y equilibrada entre sí.

Según el Manual de Biogás (VARNERO M, 2011), los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas generales:

a) Hidrólisis

Los microorganismos responsables de la hidrólisis, catabolizan sacáridos, proteínas, lípidos y otros constituyentes menores de la biomasa: *Bacteroides*, *Lactobacillus*, *Propioni-bacterium*, *Sphingomonas*, *Sporobacterium*, *Megasphaera*, *Bifidobacterium*.

b) Etapa fermentativa o acidogénica

La mayoría de los microorganismos acidogénicos también participan en la hidrólisis se les llaman bacterias acetogénicas y son las productoras de hidrógeno, catabolizan ciertos ácidos grasos y productos finales neutros. El género *Clostridium*, *Paenibacillus* y *Ruminococcus* están se encuentran presentes en todas las fases del proceso de fermentación, pero son dominantes en la fase acidogénica.

c) Etapa acetogénica

Bacterias homoacetogénicas, estas bacterias sólo pueden sobrevivir en simbiosis con el género que consume hidrógeno, catabolizan compuestos monocarbonatados. Todos los microorganismos acetogénicos tienen un período de regeneración de hasta 84 h.

d) Etapa metanogénica

Las bacterias metanogénicas activas aparecen desde la fase acidogénica. Sin embargo, el número de arqueas metanogénicas aumenta en la fase metanogénica, y catabolizan acetato y los compuestos monocarbonatados producidos en la etapa acetogénica para producir metano. Las principales especies están representadas por *Methanobacterium*, *Methanospirillum hungatii*, y *Methanosarcina*.

En la digestión anaeróbica, la materia orgánica pasa de moléculas complejas a transformarse en moléculas simples en ausencia de un aceptor de electrones en este caso el oxígeno, mediante microorganismos a través de reacciones de oxidación – reducción bajo condiciones de oscuridad y a cierta temperatura.

Entonces, el producto generado en ese catabolismo acepta los electrones liberados durante la descomposición de la materia orgánica. Por esta razón, la materia en todo su proceso dentro del biodigestor actúa como dador y aceptor de electrones, ya que las bacterias dependen entre sí para desarrollarse. En el proceso, el sustrato es parcialmente oxidado y solo una pequeña cantidad de la energía contenida se conserva.

La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos), son hidrolizadas por enzimas producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga) que serán metabolizados por las bacterias acidogénicas que producen ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios.

Los ácidos grasos son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos son los que producen metano a partir de ácido acético, H₂ y CO₂.

Las fases de la digestión anaeróbica antes mencionadas se esquematizan a más detalle en la **Ilustración 2** y **Tabla 2**.

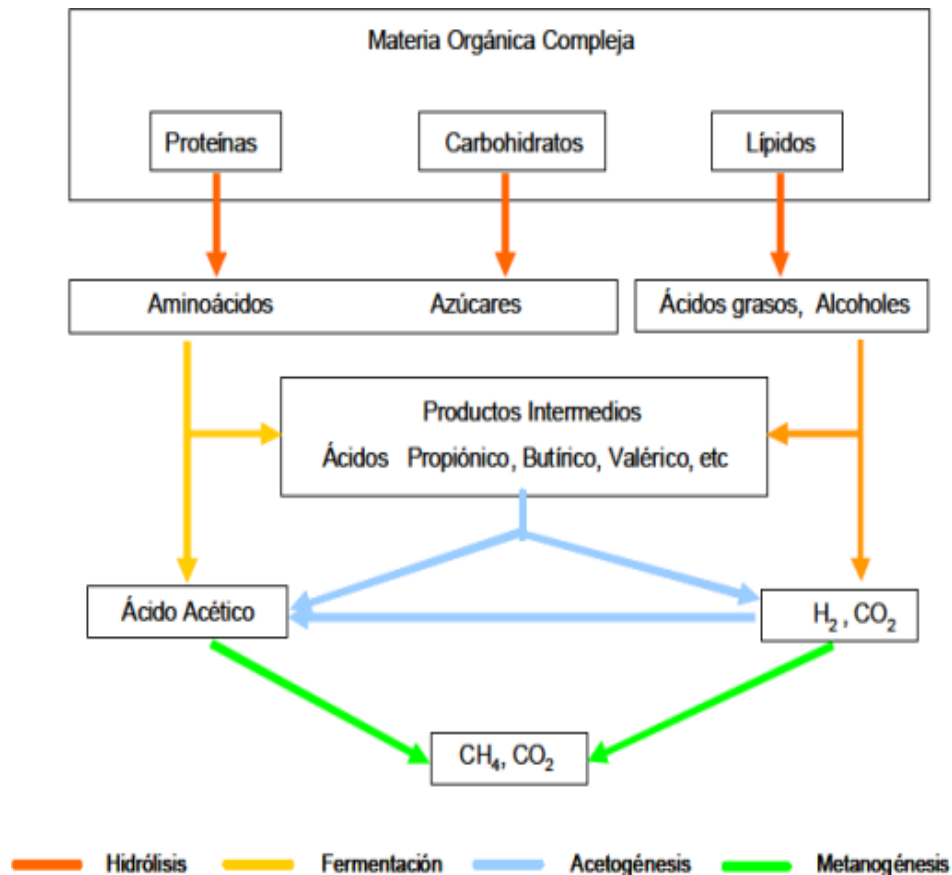


Ilustración 2. Etapas del proceso de digestión anaeróbica (VERJEL & PEÑARETE, 2010)

En conclusión, la digestión anaeróbica de compuestos orgánicos es un proceso complicado, se producen un gran número de reacciones bioquímicas y donde se presentan gran variedad de bacterias como se explicó anteriormente.

Tabla 2. Reacciones Bioquímicas en la digestión anaeróbica de la materia orgánica. (ZINDER, 1998)

Tipo de Reacción	Ecuación
Fermentación de glucosa a acetato	Glucosa + 4H ₂ O → CH ₃ COO ⁻ + 4H ⁺ + 4H ₂
Fermentación de glucosa a butirato	Glucosa + 2H ₂ O → C ₄ H ₇ O ₂ + 2HCO ₃ ⁻ + 3H ⁺ + 2H ₂
Fermentación del butirato a acetato y H ₂	Butirato + 2H ₂ O → 2CH ₃ COO ⁻ + H ⁺ + H ₂
Fermentación del propionato a acetato	Propionato + 3H ₂ → CH ₃ COO ⁻ + HCO ₃ ⁻ + H ⁺ + H ₂
Acetogénesis a partir de H ₂ y CO ₂	HCO ₃ ⁻ + H ⁺ + 4H ₂ → CH ₃ COO ⁻ + 2H ₂ O
Metanogénesis a partir del CO ₂ y H ₂	HCO ₃ ⁻ + 4H ₂ → CH ₄ + 3H ₂ O
Metanogénesis a partir del acetato	Acetato + H ₂ O → CH ₄ + HCO ₃ ⁻ + H ⁺

La ecuación general del proceso de fermentación sería la siguiente:



Para evitar especies de bacterias metanotróficas (bacterias que consumen metano) dentro del biodigestor, se busca operar el reactor con el menor oxígeno porque esta especie se da en un ambiente aeróbico, y de esta forma utilizan el oxígeno para degradar el metano y obtener su energía de crecimiento.

La digestión anaeróbica funciona satisfactoriamente dependiendo de las condiciones presentes en el medio de reacción. Para poder tener un adecuado desarrollo de las bacterias degradativas que actúan sobre la materia es de gran importancia conocer de qué forma la composición del sustrato contribuye a la biodegradación de una forma efectiva.

En la digestión anaeróbica más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano en comparación al 50% consumido en un sistema aeróbico (VARNERO M, 2011).

Distintos parámetros físicos, químicos y de concentración de la materia siempre delimitan los procesos anaeróbicos. Algunos de los factores muy importantes a considerar para que los microorganismos sobrevivan y produzcan metano, y son: la relación carbono/nitrógeno (C/N) de la materia, la concentración de sólidos de la misma, la temperatura del proceso, condiciones oxido-reducción óptimas y pH del sustrato.

En algunas ocasiones, y cuando se quiere obtener un resultado lo más exacto posible se utilizan distintos tanques de fermentación por separado para cada etapa de la digestión anaeróbica. Esto se debe a que las bacterias en cada una de las etapas se reproducen mejor a un cierto pH, Temperatura y componentes promotores que afectan su producción.

En conclusión, si nuestro biodigestor opera con valores adecuados de los factores antes mencionados, la fermentación puede llegar a ser más eficiente hasta el grado de producir mayor cantidad de biogás o aumentar la rapidez de digestión.

2.1 Características de la biomasa para fermentación anaeróbica

Las características bioquímicas que presenten los residuos posteriormente a degradar deben permitir el desarrollo de la actividad microbiana.

El proceso microbiológico requiere materias primas con contenido de Carbono y Nitrógeno, además de sales minerales (Azufre, Fosforo, Potasio, Calcio, Magnesio, Hierro, Manganeso, Molibdeno, Zinc, Cobalto, Selenio, Tungsteno, Níquel y otros menores pero que tienen que estar presentes en menor concentración y en cierto equilibrio). Los componentes más considerables para la producción de biogás son el Carbono y el Nitrógeno.

Algunos ejemplos de materias primas que se pueden utilizar para el proceso, se muestran en la **Tabla 3:**

Tabla 3. Residuos orgánicos de origen diverso.

Tipo de residuo	Materia orgánica
Residuos de origen animal	Estiércol, orina, residuos de mataderos (sangre y otro), residuos de pescados entre otros.
Residuos de origen vegetal	Malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje.
Residuos de origen humano	Heces, basura orgánica, orina.
Residuos agroindustriales	Salvado de arroz, gabazo de la uva, melaza de la remolacha azucarera, residuos de semillas.
Residuos forestales	Hojas, ramas y cortezas
Residuos de cultivos acuáticos	Algas marinas, malezas acuáticas.

Prácticamente, toda la materia orgánica es capaz de producir biogás, siempre y cuando contengan carbohidratos, proteínas, grasas y celulosa como componentes principales. La calidad y cantidad de biogás generado dependerá de la composición y naturaleza del residuo utilizado.

Normalmente, en el caso de sustratos orgánicos como el estiércol de animales, se encuentran compuestos en proporciones adecuadas sin necesidad de agregar o quitar algún elemento químico. Sin embargo, en digestión de desechos industriales, residuos urbanos o mezclas de materia orgánica, puede presentarse la adición de compuestos o algún post-tratamiento antes de someterlos a digestión anaeróbica.

Además de la producción de biogás, el estiércol bovino ya biodigerido presenta porcentajes aceptables de Nitrógeno (0.8%), Fosforo (0.04%) y Potasio (0.26 %) (Tabla 4) para utilizarse como fertilizante natural.

Tabla 4. Elementos en el estiércol bovino fresco y biodigerido. (CASTILLO, 2009)

Elemento	Estiércol bovino fresco (%)	Estiércol biodigerido (%)
Nitrógeno (N)	1.36	0.8
Carbono (C)	30	---
Fosforo (P)	0.16	0.04
Potasio (K)	0.14	0.26
Magnesio (Mg)	0.15	0.04
Calcio (Ca)	0.43	0.08
Hierro (Fe)	435 (mg/kg)	72 (mg/kg)
Cobre (Cu)	11 (mg/kg)	4 (mg/kg)
Zinc (Zn)	28 (mg/kg)	6 (mg/kg)

2.1.1 Relación carbono/nitrógeno (C/N)

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas (bacterias productoras de metano). El carbono contiene la fuente de energía y el nitrógeno ayuda a la formación de nuevas células.

Los microorganismos siempre consumen estos elementos en determinada proporción, medidos por la relación C/N que contiene la materia orgánica. La materia prima rica en Nitrógeno tiene una mayor velocidad de degradación, esto quiere decir que la fermentación de la materia ocurre en un tiempo menor comparado con las ricas en carbono, aunque se obtienen cantidades menores de biogás. En cambio, las materias primas ricas en carbono tienen una velocidad de degradación más lenta, por lo tanto, mayor cantidad de biogás generado en un periodo de tiempo más largo.

Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo tanto la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 20-30:1 (GUEVARA V, 1996).

Es por esta razón que se busca una biomasa residual que se encuentre balanceada en carbono y nitrógeno de acuerdo a las necesidades microbiológicas. En el caso de sustratos orgánicos como el estiércol de animales presentan una relación C/N en proporciones adecuadas sin necesidad de agregar o quitar algún elemento.

La excreta de bovinos resulta la más conveniente para la digestión anaeróbica ya que su relación C/N de 25:1 esta balanceada y hace que la digestión anaeróbica produzca buena cantidad de metano a una velocidad de degradación aceptable. En la **Tabla 5** se muestran distintos residuos orgánicos con su respectiva relación C/N y las que más se aproximan al rango óptimo de 20-30:1 son las excretas de: bovinos, conejos, gallinas; y de residuos vegetales: las leguminosas y tubérculos. Pero esto no quiere decir que las materias primas que no se encuentren en el rango óptimo de C/N no se puedan utilizar, esto se debe a que en ciertos casos se requiere tener mayores cantidades de metano a velocidades de degradación lenta dependiendo la funcionalidad del tipo de biodigestor y digestión o simplemente por el tipo de residuo disponible a utilizarse. Muchas veces resulta conveniente el uso de ciertos residuos con distintas relaciones C/N haciendo mezclas de materias primas.

Los residuos con una relación de C/N de 8:1 o menor ocasionan que empiece a inhibirse la actividad bacteriana debido a que se forma un exceso de amonio, el cual si se acumula en grandes cantidades es toxico y las bacterias empiezan a morir inhibiendo así el proceso (VARNERO M, 2011).

Tabla 5. Valores promedio aproximados de la relación C/N de residuos orgánicos (VARNERO & ARELLANO, 1990).

Materia orgánica	%C	%N	C/N
Excretas			
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Ovinos	35	1.00	35:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Caprinos	40	1.00	40:1
Conejos	35	1.50	23:1
Gallinas	35	1.50	23:1
Patos	38	0.80	47:1
Pavos	35	0.80	50:1
Humanas	2.5	0.85	3:1
Residuos Vegetales			
Paja de trigo	46	0.53	87:1
Paja de cebada	58	0.64	90:1
Paja de arroz	42	0.63	67:1
Paja de avena	29	0.53	55:1
Rastrojos de maíz	40	0.75	53:1
Leguminosas	38	1.50	28:1
Hortalizas	30	1.80	17:1
Tubérculos	30	1.50	20:1
Hojas secas	41	1.00	41:1
Aserrín	41	0.06	730:1

Cuando no se tiene una relación inicial de C/N apropiada, es necesario realizar mezclas de residuos en las proporciones adecuadas para obtener la C/N deseada.

Sobre la base del contenido de carbono, nitrógeno y peso fresco de cada una de las materias primas puede calcularse la relación C/N de la mezcla aplicando la siguiente fórmula (VARNERO M, 2011):

$$(1)$$

$$K:1 = \frac{(C1)(P1) + (C2)(P2) + \dots + (Cn)(Pn)}{(N1)(P1) + (N2)(P2) + \dots + (Nn)(Pn)}$$

Dónde:

K:1= C/N de la mezcla de materias primas.

C= % de carbono contenido en la materia prima.

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

P= Peso fresco de cada materia prima, expresado en kilos.

2.1.2 Concentración de la materia orgánica a degradar

Para que el proceso de fermentación se lleve a cabo de una forma continua no es conveniente que la carga a degradar este muy concentrada ni tampoco demasiado diluida.

La materia orgánica se compone de agua y una fracción sólida que se le conoce como sólidos totales (*ST*). El porcentaje de sólidos totales que debe tener la mezcla a degradar en el biodigestor es un factor importante a considerar para asegurarse que el proceso se efectuará satisfactoriamente. Por otro lado, los sólidos volátiles (*SV*) es la porción de sólidos totales que se liberan de una muestra, volatilizándose cuando se calienta aproximadamente a 600°C, los sólidos volátiles contienen componentes orgánicos, los que teóricamente son los que se convierten en metano.

Es importante conocer el porcentaje de sólidos totales de la materia orgánica fresca porque así se puede conocer que tanta agua o solución se debe agregar al momento de preparar la mezcla de carga diaria para que el biodigestor funcione correctamente. Por ejemplo, el estiércol bovino fresco contiene 20% de sólidos totales (**Tabla 6**) entonces el 80% es humedad, esto quiere decir que al momento de agregar agua al estiércol se tiene que tener en cuenta la humedad que contiene. Por otro lado el porcentaje de solidos volátiles indica que tanto biogás se va a producir, como por ejemplo en el caso de la paja de arroz fresca que contiene 76.41% de *SV* comparada con el estiércol bovino que contiene 15.8% de *SV*, puede estimarse que se producirá más biogás

con la paja de arroz, ya que si se evalúa su relación C/N podemos notar que contiene más carbono que el estiércol bovino.

Como se aprecia en la **Tabla 6** y **Tabla 7** el porcentaje de sólidos totales no varía tanto, excepto que en la segunda tabla es una mezcla de paja molida con estiércol llamada comúnmente “Bovinaza, gallinaza, etc...”, en la primera es solo estiércol fresco.

Tabla 6. Análisis de resultados de sólidos totales y volátiles de diversos sustratos orgánicos, efectuados por el Instituto Industrial de Microbiología de Shanghai (GUEVARA V, 1996).

Materiales	(%)	Sólidos	
		Totales (ST)	Sólidos Volátiles (SV)
Estiércol porcino	Frescos %	27.4	20.97
	Seco %	100	76.54
	SV %	-----	100
Estiércol bovino	Frescos %	20.0	15.8
	Seco %	100	76.89
	SV %	-----	100
Estiércol de aves	Frescos %	68.9	56.64
	Seco %	100	82.20
	SV %	-----	100
Paja de arroz	Frescos %	88.82	76.41
	Seco %	100	86.02
	SV %	-----	100
Pasto verde	Frescos %	15.9	12.93
	Seco %	100	81.32
	SV %	-----	100

Tabla 7. Valores en porcentajes de sólidos totales y sólidos volátiles (OLAYA & GONZALEZ, 2009)

Material	Humedad (%)	Sólidos Totales (%)	Sólidos Volátiles (% SV)
Gallinaza	65.0	35.0	65.0
Bovinaza	86.0	14.0	80.0
Porquinaza	87.0	13.0	85.0
Basura de mercado (orgánica)	1.0	99.0	77.0
Papel periódico	7.0	93.0	97.1
Desechos agrícolas	7.2	37.0	63.0
Humanaza	73.0	27.0	92.0
Orina	94.0	6.0	75.0

Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores semicontinuos (Ver sección: 3.2.2) debe tener entre 8% y 12% de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento. También es necesario una buena agitación de la mezcla para que las bacterias se homogenicen en todo el reactor.

En los digestores semicontinuos se requiere que la mezcla se encuentre más diluida para que fluya fácilmente en el reactor, a diferencia de los digestores discontinuos (Ver sección: 3.2.3) que tienen entre un 40% a 60% de sólidos totales (VARNERO M, 2011).

Para tener una mezcla deseada se puede calcular el volumen de agua que se debe mezclar con la materia prima fresca, es necesario conocer el porcentaje de sólidos totales que contiene. Se puede calcular con la siguiente formula (VARNERO M, 2011):

$$\% ST (\text{Carga diluida}) = \frac{(1 \text{ Kg.excreta})(ST \text{ en excreta fresca})}{(1 \text{ Kg excreta fresca})+(Agua agregada (W))} \quad (2)$$

Ejemplo:

Si se tiene estiércol bovino fresco con un 20% ST (**Tabla 6**) y se quiere dejar la concentración con sustrato al 5%. ¿Cuánta agua se debe agregar por cada kilogramo de excreta fresca?

$$0.05 = \frac{(1)(0.20)}{1 + W_{agua}} \rightarrow 0.05 + 0.05W_{agua} = 0.20$$

$$W_{agua} = \frac{0.15}{0.05} = 3 \frac{\text{litros de agua}}{\text{kg. excreta fresca}}$$

Esto quiere decir que en este caso la mezcla tendría una proporción 1:3 (materia: agua).

Pizarro (PIZARRO C., 2006), menciona que la producción de biogás es de aproximadamente 2 m³/vaca al día, asumiendo que cada vaca produce 5.73 kg de sólidos volátiles de estiércol por día, y que la digestión anaeróbica produce aproximadamente 350 L. de biogás por kg de sólidos volátiles.

2.1.3 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La Demanda Química de Oxígeno, es la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar químicamente el material orgánico. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO₂/l), cuanto mayor es la DQO más contaminada esta la muestra.

Como se puede ver en la **Tabla 8**, heces de animales de cría junto con agua de lavado se pueden usar para que el biodigestor produzca metano, aunque el rango de la demanda química de oxígeno máxima (DQO) sea de 3 – 17 g/l (VARNERO M, 2011), se trata de dejar el reactor con la menor DQO posible para obtener mayor cantidad de biogás.

En el caso de sólidos como estiércol fresco de ganado bovino, residuos domésticos y restos de cosecha, si se mezclan con agua potable no tendremos una DQO significativa, sin embargo si se

utiliza agua residual de lavado de los establos para la mezcla, se tiene que analizar la DQO para dejarla en un valor óptimo para la fermentación.

A continuación en la **Tabla 8** se clasifican los sustratos en cuatro clases en función de su apariencia física, nivel de dilución, grado de concentración y las características cuantitativas necesarias para el proceso anaeróbico, como el porcentaje de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y demanda química de oxígeno (DQO). En color rojo, los tipos de sustratos más utilizados.

Tabla 8. Clasificación de sustratos para la Digestión Anaeróbica (VARNERO M, 2011).

Características	Tipo de Sustrato	Características Cuantitativas
Sólido	Basura Domestica	>20% (ST)
	Estiércol Solido	40 % – 70 % (Fracción Orgánica)
	Restos de Cosecha	
Lodo altamente contaminado, alta viscosidad	Heces de Animales.	100 - 150 g/l (DQO) 5%-10% (ST) 4% - 8% (SV)
Fluidos con alto contenido de sólidos suspendidos (SS)	Heces de Animales de cría y levante diluido con agua de lavado.	3 - 17 g/l (DQO) 1 – 2 g/l (SS)
	Aguas residuales de mataderos.	
Fluidos muy contaminados, sólidos en suspensión.	Aguas residuales de agroindustrias	5 – 18 g/l (DQO)
	Aguas negras	4 – 500 g/l (DQO)

2.1.4 Promotores e Inhibidores de la digestión anaeróbica.

En la mezcla de alimentación es necesario tomar en cuenta algunos compuestos que podrían inhibir poco a poco el proceso digestivo hasta provocar inestabilidad, y que algunas se producen dentro del digester como subproducto de la actividad metabólica de los microorganismos. Por otro lado pueden ser razones operativas o de mantenimiento que ocasionan inhibición de proceso, como por ejemplo que el sistema no se encuentre completamente hermético.

Entre las sustancias no deseables se encuentra el amoníaco (NH₃) y ácido sulfhídrico (H₂S). El amoníaco en pequeñas concentraciones incluso mayores a 0.15 g/l, actúa como inhibidor, y el ácido sulfhídrico en concentraciones mayores a 50 mg/l se considera inhibidor del proceso. (TAMAYO, 2009).

La etapa metanogénica es la más sensible a estos inhibidores, en esta etapa es donde se produce el biogás se debe cuidar que no se encuentren estas concentraciones tóxicas en esas cantidades. Aunque, en algunos casos estos componentes en bajas concentraciones pueden ser estimulantes del proceso. En conclusión, cuando estos inhibidores se encuentren en concentraciones mayores a las que la digestión anaeróbica demanda, podrá notarse deficiencia en la cantidad de biogás que se esté produciendo. En la **Tabla 9** se muestran sustancias inhibidoras del proceso anaeróbico y las cantidades de concentración que inhiben la actividad microbiana.

Tabla 9. Concentración inhibidora de sustancias (VARNERO M, 2011) y (TAMAYO, 2009).

Inhibidores	Concentración inhibidora
Sulfatos (SO ₄)	5000 ppm
Fosfatos (PO ₄)	50 – 150 ppm
Cloruro de sodio (NaCl)	40000 ppm
NO ₃	0.05 mg/ml
Cobre (Cu)	100 mg/l
Cromo (Cr)	20 mg/l
Níquel (Ni)	200 – 500 mg/l
Detergente sintético	20 – 40 mg/l
Sodio (Na)	3500 – 5500 mg/l
Potasio (K)	2500 – 4500 mg/l
Calcio (Ca)	2500 – 4500 mg/l
Magnesio(Mg)	1000 – 1500 mg/l
Relación C:N:P:S	2000:15:5:3
Hierro (Fe)	10 – 200 ppm
Oxígeno (O ₂)	1 ppm
Zinc (Zn)	0 – 3 ppm

En cambio, los promotores de la digestión son materiales que pueden hacer más eficiente la degradación de la materia orgánica y por consiguiente obtener una mayor producción de biogás.

Entre estos materiales se encuentran la urea, carbonato de calcio, enzimas, sales orgánicas y celulosa (GUEVARA V, 1996). Cuando se carga el digestor, es conveniente agregar celulosa, urea o carbonato de calcio para promover el proceso y la producción de gas. La urea acelera la producción, el carbonato de calcio para la generación de gas y aumentar el contenido de metano en el gas.

Una inoculación obtenida de un biodigestor que se encuentre funcionando se puede considerar como promotor porque los microorganismos se desarrollan más rápido y alcanzan la estabilidad en las primeras etapas del proceso haciendo que se acorte el tiempo de retención, con esto puede incrementarse la producción de biogás por kilogramo de estiércol digerido.

2.2 Factores físicos y químicos a considerar para la digestión anaeróbica

2.2.1 Temperatura de operación

La temperatura es de gran influencia en la velocidad de degradación de la biomasa. A mayor temperatura, mayor velocidad de reacción del proceso, así como un aumento en la velocidad de crecimiento de los microorganismos, por lo tanto una mayor producción de biogás.

El ciclo digestivo al ser más rápido a altas temperaturas, determina que la capacidad de digestor debe ser mayor a menores temperaturas que a altas temperaturas.

En la **Ilustración 3** y **Ilustración 4**, se puede apreciar que la temperatura juega un papel muy importante en la velocidad de reacción y de la producción de biogás dentro del biodigestor. Conforme la temperatura va aumentando, el Tiempo de Retención ira disminuyendo hasta que se estabilice la producción de biogás.

En la **Ilustración 4**, se muestran registros de producción de biogás a ciertas temperaturas de distintos autores, y se puede notar que varían mucho los resultados debido a que los casos de

estudio no son los mismos, pero la tendencia de la producción de biogás respecto a la temperatura es similar. De esta forma se puede comprobar que a mayor temperatura mayor producción de biogás.

La temperatura mínima necesaria para que inicie el proceso es de 5°C y la temperatura máxima no debe sobrepasar los 70°C (TAMAYO, 2009).

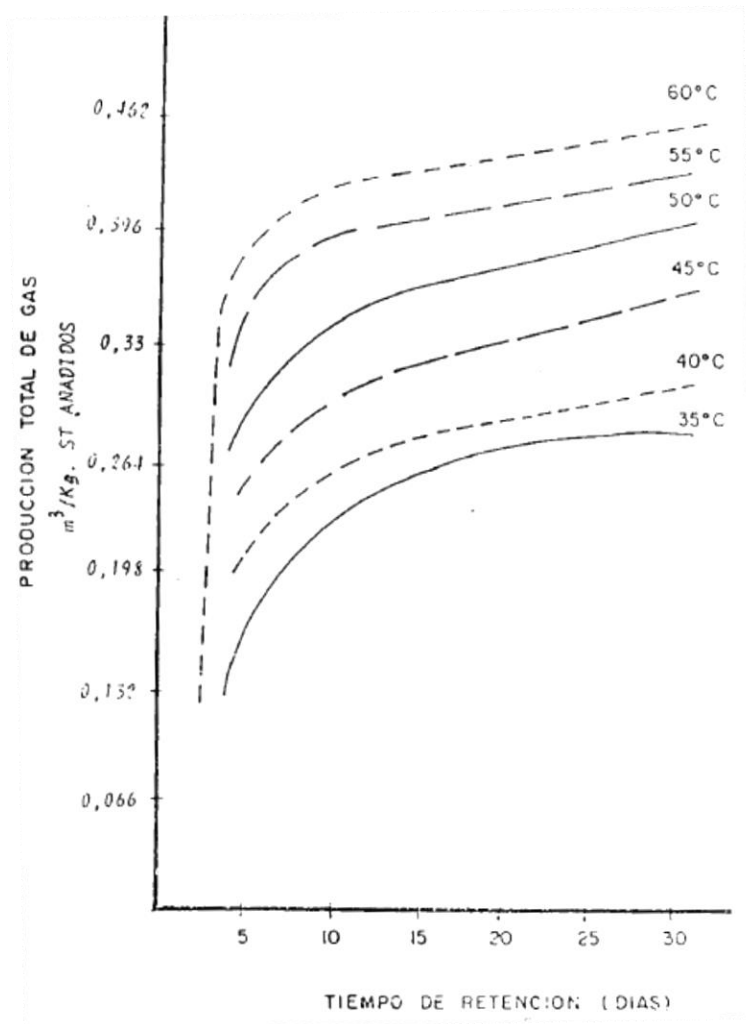


Ilustración 3. Gráfica de la tendencia del efecto de la temperatura y tiempo de retención sobre la producción de biogás. (GUEVARA V, 1996).

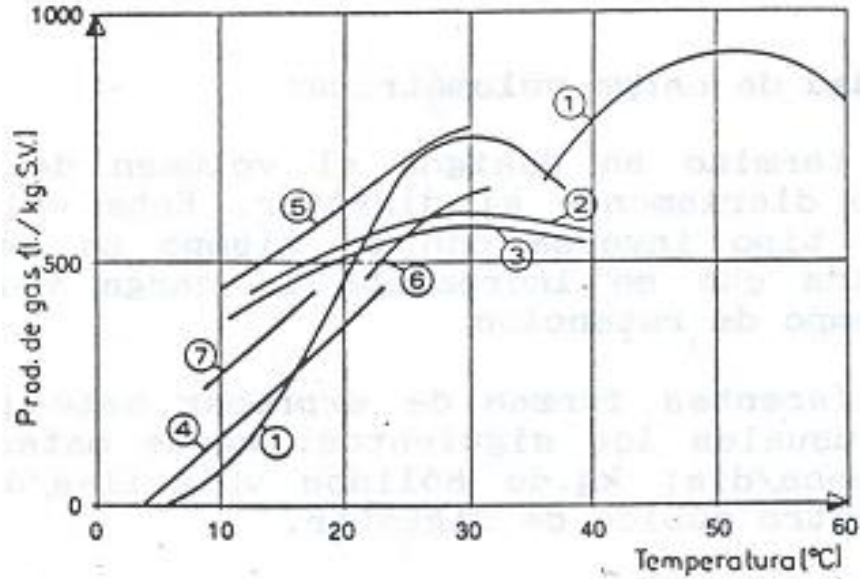


Ilustración 4. Gráfica de la producción de biogás a distintas temperaturas, resultados de varios autores. (HILBERT, 2003).

Los distintos rangos de temperatura de la digestión anaeróbica se pueden dividir en 3 tipos como se muestra en la **Tabla 10**:

Tabla 10. Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica (VARNERO M, 2011).

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación o Tiempo de retención
Psicrofílica	4 – 10 °C	15 – 18 °C	20 – 25 °C	Mayor a 100 días
Mesofílica	15 – 20 °C	25 – 35 °C	35 – 45 °C	30 – 60 días
Termofílica	25 – 45 °C	50 – 60 °C	75 – 80 °C	10 – 15 días

A continuación, la **Tabla 11** muestra el biogás que se produce con el estiércol fresco de ganado bovino a distintas temperaturas, y se puede comprobar que a mayor temperatura mayor producción de biogás por cantidad de sólidos totales. De esta forma se puede cuantificar que tanto biogás se produciría a cierta temperatura con cualquier cantidad de estiércol fresco con cierto porcentaje de sólidos totales.

Tabla 11. Biogás producido a distintas temperaturas usando estiércol fresco de ganado bovino. (CASTILLO, 2009)

1 Kg de Estiércol de bovino Fresco (EF) → 0.20 Kg de Sólidos Totales (ST)	
1 Kg de Sólidos Totales (ST)	0.8 Kg de Sólidos Volátiles (SV)
1 Kg de Sólidos Totales (ST)	0.3 m ³ de Biogás @ (35°C y Pr. Atm.)
1 Kg de Sólidos Totales (ST)	0.25 m ³ de Biogás @ (30°C y Pr. Atm.)
1 Kg de Sólidos Totales (ST)	0.2 m ³ de Biogás @ (25°C y Pr. Atm.)
1 Kg de Sólidos Totales (ST)	0.16 m ³ de Biogás @ (22°C y Pr. Atm.)
1 Kg de Sólidos Totales (ST)	0.10 m ³ de Biogás @ (18°C y Pr. Atm.)

Para un adecuado funcionamiento (OLAYA & GONZALEZ, 2009) recomienda los siguientes rangos de temperatura: 0 - 20°C para el ambiente psicrófilo, 20 - 45°C para el ambiente mesófilo, y para el ambiente termófilo 45 - 97°C.

Es recomendable tener una temperatura uniforme en la mezcla para que se tenga un buen desempeño de las bacterias. Variaciones abruptas de la temperatura de operación pueden desencadenar desestabilización del proceso, provocando la mortandad de las bacterias, hasta disminuir progresivamente la producción de biogás.

Para un óptimo funcionamiento de un biodigestor se recomienda que el tratamiento anaeróbico se diseñe para que opere con variaciones de temperatura que no excedan el rango de 0.6°C – 1.2°C al día (VARNERO M, 2011).

Una temperatura homogénea dentro del digestor se logra mediante un sistema de agitación, así como un constante monitoreo mediante un controlador de temperatura.

Por otro lado, una forma de forzar un aumento y una temperatura constante dentro del reactor, se logra con un calentamiento de agua mediante un calentador solar y de esta forma hacer circular agua caliente entre la mezcla con tuberías aisladas en forma de serpentín, de esta forma se puede obtener una temperatura aproximada deseada para la fermentación (**Ilustración 5**).



Ilustración 5. Calentador solar para una planta de biogás en Afganistán. (MEARS & ANDERSON, 2011)

Asimismo, al aumentar la temperatura, la solubilidad de los gases producidos desciende. Esto es benéfico para el crecimiento de los microorganismos ya que algunos gases como el NH_3 , H_2 y H_2S se consideran tóxicos; Entonces, al momento de que su solubilidad baja ya no tienen tanto contacto con el proceso, debido a que tienden a gasificarse y salir más rápido del gasómetro, donde posteriormente son filtrados.

2.2.2 Tiempo de retención hidráulica o de fermentación

El tiempo de retención hidráulica (TRH), es el tiempo que tardan las bacterias para degradar completamente la materia orgánica, por lo tanto, es el tiempo que permanece la materia orgánica dentro del reactor antes de ser extraída y reusarla como fertilizante. Esta velocidad de degradación depende de la temperatura; a mayor temperatura menor es el tiempo de retención de la materia (Ver [Tabla 10](#)).

El volumen de sustrato orgánico a degradar diariamente tiene una relación inversa con el tiempo de retención, esto se debe a que a un mayor volumen de mezcla diaria a una temperatura mayor, conlleva a un decremento en el tiempo de retención porque se producirán más bacterias.

El volumen de la carga en el reactor y el tiempo de retención son los principales parámetros de diseño de un biodigestor, definiendo así el volumen del reactor mediante la siguiente relación (GUEVARA V, 1996):

$$\frac{V_{Total} (m^3)}{TRH (días)} = V_{carga\ diaria} \left(\frac{m^3}{día} \right) \quad (3)$$

2.2.3 Rangos de pH

El control de pH dentro del biodigestor es muy importante, ya que los microorganismos metanogénicos presentan una gran sensibilidad a sus fluctuaciones.

Se debe considerar que durante el proceso anaeróbico hay variaciones del pH que pueden ser soportados y equilibrados por el digestor mismo, siempre y cuando la mezcla se someta a prueba de pH en una cámara de mezclado antes de ser introducida al biodigestor.

El rango de pH óptimo para la digestión anaeróbica se encuentra entre 6.5 y 7.5. (GUEVARA V, 1996) y (TAMAYO, 2009). Por otro lado, según el manual de biogás de (VARNERO M, 2011) determina que el rango de pH óptimo se encuentra entre 6 y 8, siendo el pH neutro el ideal. El valor del pH no solo determina en cierta forma que tanto biogás se va a producir, sino también su composición. Si el pH desciende por debajo de 6, el biogás generado será muy pobre en metano y por lo tanto tendrá un poder calorífico menor, en cambio sí sobrepasa un pH de 8 se forma amoniaco que inhibe el crecimiento de las bacterias ya que se considera tóxico.

Como podemos ver en la

Tabla 12, un valor de pH de 6.2 empieza a retardar la acidificación que resulta inconveniente para la etapa fermentativa o acidogénica que es la que produce H₂, necesario para el crecimiento de las bacterias homoacetogénicas de la etapa acetogénica. En caso contrario, retardar la generación de amonio resulta conveniente, ya que un pH menor a 7.6 es benéfico para el proceso.

Tabla 12. Comportamiento de la carga de fermentación dentro del biodigestor, de acuerdo con el valor del pH (OLAYA & GONZALEZ, 2009).

pH	Comportamiento
7 – 7.2	Optimo
6.2	Retarda la acidificación
7.6	Retarda la amonización

Una forma de suplementar y controlar la alcalinidad en la mezcla, en caso de ser necesario, se logra agregando bicarbonato de sodio, cal, hidróxido de amonio, potasio, seguido de una medición, hasta lograr el pH deseado.

2.2.4 Agitación

La agitación de la mezcla dentro del biodigestor es necesaria, ya que se busca que se homogenice todo el material a degradar para que las bacterias actúen uniformemente en la mezcla y de esta forma que no existan zonas puntuales sin actividad microbiana. Para lograr esto se agrega un sistema de agitación dentro de la mezcla, así las bacterias pueden lograr tener contacto con el nuevo sustrato agregado al reactor.

Con un sistema de agitación se evitan los sedimentos y las natas con espuma que se forman en la superficie del sustrato y que pueden ocasionar que la salida del biogás y del biofertilizante se vea obstruida. Además, la agitación aumenta la producción de biogás y disminuye el tiempo de retención, debido a que hay mayor contacto de bacterias con el material a degradar.

El sustrato de un biodigestor usualmente se tiene que estar agitando en intervalos de tiempo que va desde varias veces al día y en algunas ocasiones varias veces por hora. La elección de la velocidad de giro y duración de periodos de agitación depende del tipo de biomasa y del tipo de digestor.

La velocidad de giro de estos agitadores puede ser de 50 a 1500 RPM. De manera general, estos agitadores operan con velocidades de 300 RPM y por intervalos de tiempo de 1 hora continua con pausas de 30 minutos en biodigestores grandes. (TAMAYO, 2009). Por otro lado, (WELLINGER, 1999) indica que la velocidad de rotación no es tan importante y que usualmente los agitadores rotativos pueden tener una velocidad de rotación tan baja que puede estar en el rango de 15-50 RPM.

Sin embargo, cualquiera que sea la velocidad de rotación adecuada, lo que se busca es que exista movimiento dentro del reactor y que por razones lógicas entre mayor velocidad de rotación mejor será la homogenización de la mezcla.

La agitación es importante en los biodigestores anaeróbicos por muchas razones aparte de la actividad microbiana, como por ejemplo que no se formen natas o espuma que impida la salida del biogás, también para tener una temperatura uniforme y hasta para tener un mejor manejo de la mezcla.

Es recomendable tener una cámara de mezclado previa al proceso de fermentación para determinar la concentración de la carga y mezclado, pH y temperatura antes de introducir la mezcla al biodigestor.

En la **Ilustración 6** se muestran distintos mecanismos de agitación, y su diseño varía dependiendo del biodigestor y tipos de materia orgánica a degradar. Se utilizan propelas eléctricas, palas giratorias horizontales o verticales y recirculación de la mezcla mediante bomba hidráulica.

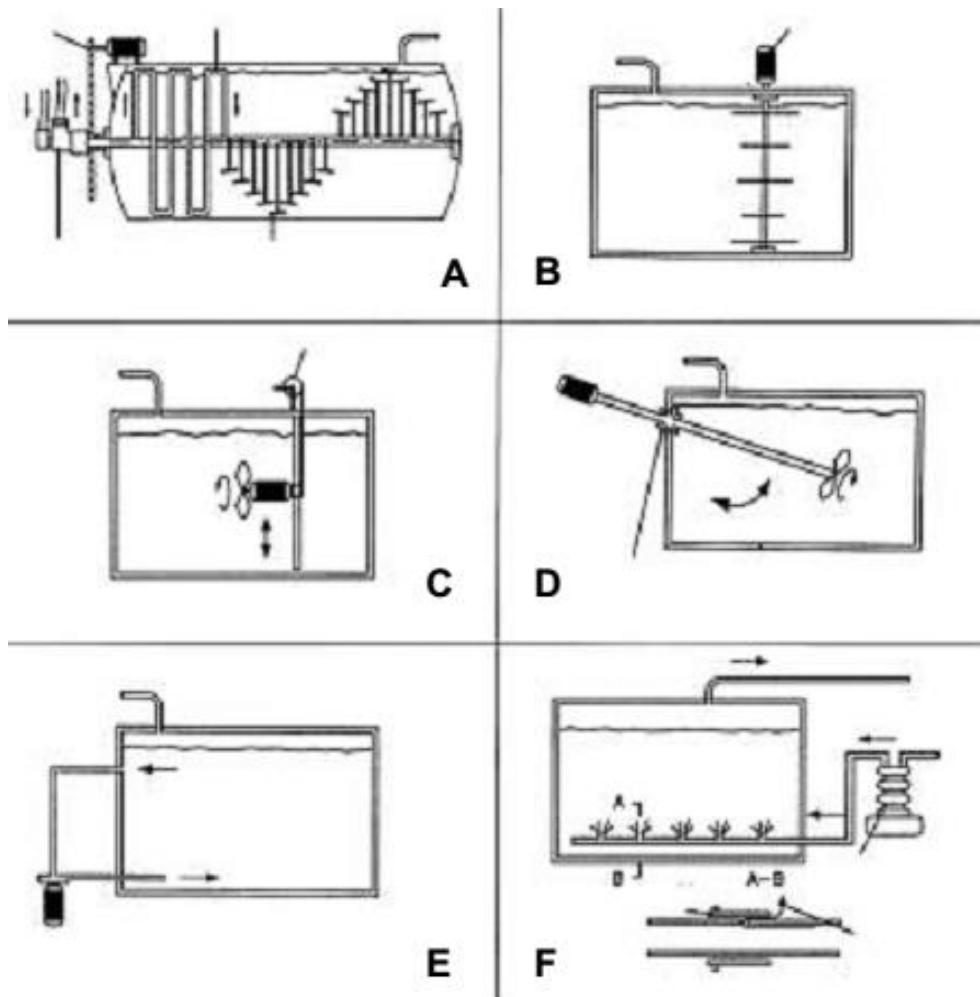


Ilustración 6. Algunos tipos de sistemas de agitación.

A: Agitador de palas horizontal.

B: Agitador de palas vertical.

C: Agitador de propela ajustable.

D: Agitador de propela con manivela.

E: Agitador hidráulico.

F: Agitadores por medio de aire.

(WELLINGER, 1999)

3 Biodigestores

Como ya se había definido en la introducción, un sistema de biodigestor consiste en un depósito completamente hermético al cual se le introduce materia orgánica para fermentarla y así obtener biogás. Para que un biodigestor opere en forma correcta debe contar con las siguientes características:

- **Hermético:** para evitar la entrada de aire, fugas de biogás.
- **Térmicamente aislado:** para evitar cambios bruscos de temperatura.
- **Disponibilidad de materia orgánica:** debe contar con medios para efectuar la carga y descarga de materia del sistema.
- **Accesos para mantenimiento.**

3.1 Partes de un biodigestor

Los elementos que constituyen a un sistema biodigestor son los siguientes:

- **Cámara de digestión:** El elemento principal de un biodigestor, es el reactor hermético en el cual ocurre la fermentación anaeróbica.
- **Cámara de mezclado/Entrada del afluente:** Un tanque de mezclado conectado a tubería donde circula el material ya preparado con las condiciones de pH, nutrientes y concentración de sustrato hacia el interior del reactor. Generalmente, ingresa por acción de la gravedad ya que la cámara de carga debe estar ubicada por arriba del nivel de líquido dentro del biodigestor.
- **Tanque de sustrato/Salida del afluente:** Un tanque de almacenamiento de sustrato fermentado conectado a la tubería de descarga.
- **Tubería de extracción de lodos o de mantenimiento:** Esta tubería se usa como drenaje del sustrato sedimentado dentro del biodigestor.
- **Sistema de conducción de gas y válvulas:** Consiste en tuberías para conducir el biogás hacia el tanque de almacenamiento y al lugar de su combustión. Las válvulas sirven para tener un mejor control y seguridad en el manejo del biogás.

- **Agitador:** Sistema de agitación para homogeneizar la mezcla.
- **Tanque de almacenamiento de biogás:** Tanque para almacenar el biogás, sirve para disponer del biogás necesario para la combustión.
- **Filtros de biogás:** Se utilizan para eliminar compuestos no deseados como el ácido sulfhídrico (H₂S) presente en el biogás antes de su uso.
- **Sistema de combustión:** Puede ser un quemador, generador de electricidad, etc...
- **Apagallamas:** Para evitar accidentes al momento de la combustión del biogás con una caída de presión en la tubería es necesario instalar apagallamas. Consiste en una caja rectangular que contiene placas de aluminio corrugado con agujeros, si se ocasionara alguna llama en la tubería, al pasar por los deflectores se enfría.

Existe una gran variedad de configuraciones y tipos de biodigestores. En esta sección se darán a conocer los tipos de biodigestores respecto a su fermentación y los modelos existentes.

3.2 Clasificación de los biodigestores

Existen muchas formas de clasificarlos, pero ninguna se puede considerar como una forma general que se aplique en todos los casos, entonces se vuelven abrumadoramente variables ya que algunos biodigestores para uso rural se podrían adaptar para uso industrial, rural, urbano o viceversa dependiendo de su aplicación.

Una forma conveniente de clasificarlos es según su modo de operación con relación a su alimentación de biomasa, de la siguiente manera:

3.2.1 Continuos

En esta configuración la carga de alimentación del biodigestor es ininterrumpida. Conforme se va agregando el afluente, al mismo tiempo sale como efluente la misma cantidad que se introduce, y dentro del biodigestor se mantiene un nivel constante. Esto se debe al tanque de almacenamiento y de mezclado previo al proceso de fermentación. A la salida, se puede construir

un tanque de post-tratamiento para aprovechar lo que queda de sustrato en el efluente ya que aún puede producir biogás pero en menor cantidad.

Se utilizan para aplicaciones industriales o para el tratamiento de aguas negras, donde hay un flujo constante de materia orgánica, es por esto que se necesitan biodigestores de tamaño grande (volumen mayor de 15 m³) y mediano (volumen entre 6.3 m³ y 15 m³) (GUEVARA V, 1996), para que la degradación tenga el tiempo suficiente para producir biogás.

En este tipo de biodigestores se produce una mayor cantidad de biogás y es uniforme en el tiempo. El biogás producido por lo regular es de uso industrial, en procesos de calentamiento o de generación de electricidad para autoabastecimiento.

3.2.2 Semi-continuos

En este tipo de proceso se introduce al biodigestor una carga inicial con gran cantidad de materia prima con un volumen de 75% del volumen total del biodigestor calculado (HERRERO, 2008). Por otro lado (GUEVARA V, 1996) menciona que el volumen de la carga inicial ocupa un 80% del volumen total del biodigestor mientras que el resto del volumen (20%) es reservado para realizar cargas continuas diarias a medida que va disminuyendo el rendimiento de biogás.

Esta carga inicial se retendrá dentro del biodigestor durante el tiempo de retención determinado en base a la temperatura de operación. Pasado este tiempo de retención se realizan cargas diarias al inicio del día y posteriormente el efluente sale en la misma cantidad agregada y se utiliza como fertilizante.

Se recomiendan temperaturas mesofílicas de 20°C - 30°C en los biodigestores semicontinuos. Debido a que el suministro de sustrato fresco no es constante, el proceso se hace bastante largo, por esta razón es necesario esta temperatura, para que acelere el proceso y obtener la mayor cantidad de biogás posible.

Los modelos que utilizan este tipo de proceso son los biodigestores chino, indio y de polietileno tubular, que se consideran de tamaño pequeño y mediano para uso rural o doméstico (Cocción de

alimentos mediante estufas simples, calefacción, iluminación, hasta un pequeño generador de electricidad).

3.2.3 Discontinuos o por lotes

Estos biodigestores se cargan en un solo lote de materia prima, es decir, se agrega una carga única y pasado su tiempo de retención se remueve completamente del biodigestor para cargarlo nuevamente con otro lote. Este tiempo de retención debe ser suficiente para que toda la materia orgánica dentro del biodigestor sea completamente degradada, para esto este tipo de sistemas deben contar con un buen mecanismo de agitación y de mezclado a nivel medio del biodigestor, puesto que el contenido de sustrato rico en nutrientes va disminuyendo con el tiempo y se va sedimentando en el fondo del biodigestor.

Un indicativo para realizar la nueva carga es mediante el rendimiento del biogás ya que cuando este decae a un bajo nivel es necesario introducir un nuevo lote de sustrato fresco.

Se recomienda tener una adecuada inoculación y temperaturas termofílicas para acelerar el proceso.

Estos biodigestores pueden ser de grande y mediana escala y pueden llegar a producir una gran cantidad de biogás por unidad de volumen, además de un biofertilizante de buena calidad, esto se debe a que el sustrato pasa más tiempo degradándose.

3.3 Tipos de biodigestores

Existe una gran variedad de biodigestores, en esta sección se muestran las configuraciones de forma general de las cuales se derivan distintos tipos de diseños.

3.3.1 Instalaciones industriales

Las instalaciones industriales de este tipo emplean tanque de metal y de concreto armado con cúpulas para gasómetro de fibra de vidrio o polietileno.

Este tipo de plantas utiliza grandes estanques o silos de recolección y almacenamiento de los residuos orgánicos contruidos de ladrillo o concreto (**Ilustración 7**). Como el proceso es continuo, es importante contar siempre con la disponibilidad de biomasa a la entrada del biodigestor en todo momento para esto cuentan con un cargador de materia prima automatizado que funciona mediante bandas de traslado de la materia o una cámara de mezclado con un tornillo sinfín que mueve y mezcla la biomasa hacia el interior del reactor. Un segundo biodigestor, puede utilizarse dependiendo de la biomasa, tiempos de retención y demanda energética, esto para fermentar lo mejor posible la materia orgánica. Se utilizan para generar electricidad mediante motores de combustión conectados a un generador eléctrico y el calor generado se utiliza como cogeneración para sistemas de calefacción.

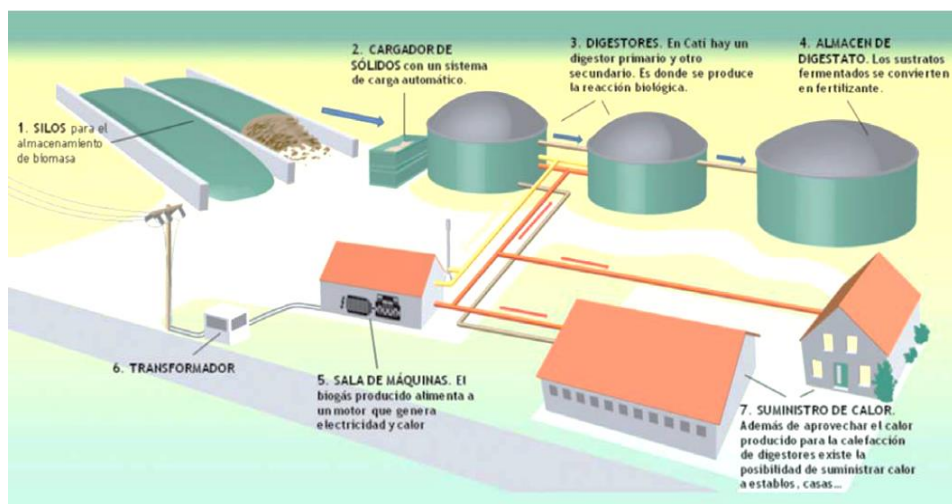


Ilustración 7. Esquema ejemplo de una instalación industrial de un sistema de biodigestor anaeróbico. (SPD, 2011)

3.3.2 Biodigestor de domo flotante

Conocido como biodigestor tipo hindú por su invención en la India, este modelo consiste de una cubierta de acero o fibra de vidrio en forma de campana que se encuentra flotando sobre una guía ubicada justo en el centro del biodigestor, haciendo que la cubierta se mueva hacia arriba debido a la presión del gas producido. Además, la cubierta se encuentra flotando sobre el sustrato o también puede estar sumergido en un canal de agua construido en las paredes del reactor, en consecuencia, el biodigestor queda completamente hermético y se logra una presión constante, lo que permite una alimentación eficiente de los equipos de combustión. Posee una división en el eje central para aumentar la retención de la materia prima, es por esto que la mezcla debe ser homogénea y bien diluida.

La presión sobre la superficie de la mezcla es muy baja, alrededor de 30 cm de columna de agua. Este tipo de biodigestor tiene una buena eficiencia en la producción de biogás, pudiendo generarse entre 0.5 – 1.0 Volumen de gas por Volumen de digestor al día (VARNERO M, 2011).

El volumen del gasómetro en este tipo de digestores es equivalente a 1/3 del volumen de gas generado al día (TAMAYO, 2009).

Se pueden considerar semi-continuos, de mezcla completa, enterrados, verticales y de tamaño chico (Volumen menor de 5 m³) a mediano (Volumen entre 6.3 – 15 m³).

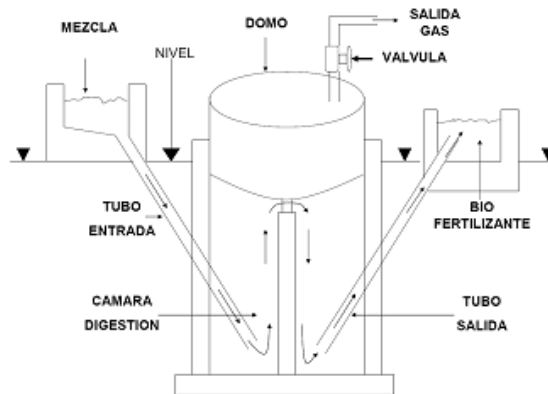


Ilustración 8. Biodigestor de domo flotante. (PEREZ, 2010)

3.3.3 Biodigestor de domo fijo

Este tipo de biodigestor es conocido como tipo chino por su invención en China y consiste en un tanque cilíndrico completamente enterrado con el techo y el piso en forma de domo. El almacenamiento de biogás no se lleva a cabo en un gasómetro independiente al biodigestor, sino en el mismo tanque reactor.

A medida que se produce biogás, este se va almacenando en el domo del biodigestor, aumentando la presión del sistema hasta 100 cm. de columna de agua. Se generan entre 0.15 – 0.20 de Volumen de gas por Volumen de digester al día (VARNERO M, 2011).

Hay una tapa de inspección en la cima del digester que facilita su mantenimiento. La cúpula guarda el gas producido durante la digestión con presiones entre 1 m y 1.5 m de columna de agua (PEREZ, 2010), aunque la presión del sistema siempre tiene fluctuaciones. Se recomienda que el volumen total de biodigestor no debe exceder 20 m³ (SASSE, 1988).

El digester chino es poco eficiente para la generación de biogás, pero es excelente para la producción de biofertilizante, esto se debe a que los tiempos de retención son en general largos.

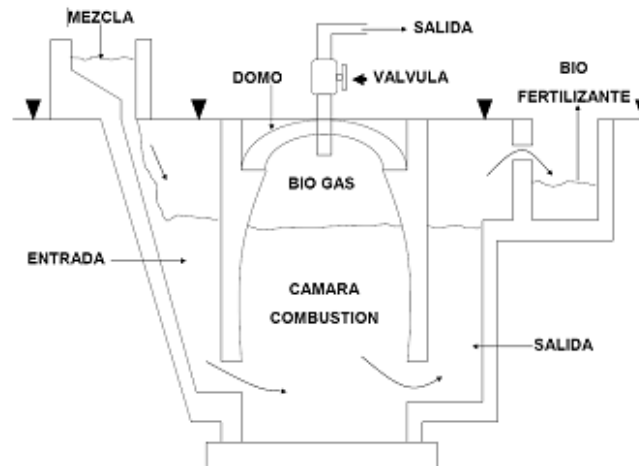


Ilustración 9. Biodigestor de domo fijo. (PEREZ, 2010)

3.3.4 Biodigestor tipo “Batch”

Este sistema es uno de los más simples para realizar la digestión anaeróbica y consiste en un tanque o depósitos herméticos con una salida para gas, una tubería de desagüe, almacenamiento de biogás mediante una campana flotante y una compuerta de mantenimiento. Siendo estos de régimen estacionario, es decir que son de tipo discontinuo donde la materia se retiene y requiere menor mantenimiento de operación (Ver página: 34). Se pueden conectar en serie varios tanques para tener siempre uno de ellos en carga o descarga con su respectivo tiempo de retención, mientras el resto se encuentre produciendo biogás.

Las materias empleadas en estos sistemas son las ricas en carbono como restos de cosechas secas que requieren un tiempo de retención mayor para que se dé la fermentación completa, es por esto que su aplicación está destinada a pequeñas y grandes explotaciones agropecuarias.

Estos biodigestores cuentan con muchas ventajas entre las cuales se puede decir que unas de las más importantes es su baja demanda de agua (un 60 – 80% menos agua que los digestores continuos y semicontinuos (VARNERO M, 2011)), no necesita sistemas de agitación, y prácticamente ninguna atención diaria lo que implica menor mano de obra de operación - mantenimiento.

La producción de biogás de este tipo de biodigestores es de 0.5 a 1 m³ de biogás/m³ de digestor (TAMAYO, 2009).

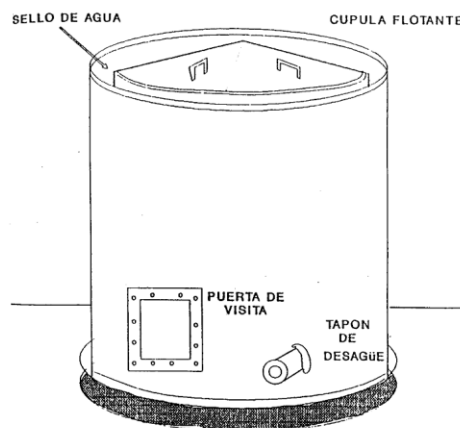


Ilustración 10. Biodigestor tipo “Batch”. (GUEVARA V, 1996)

3.3.5 Reactores de flujo ascendente o descendente

Consiste en un tanque tubular vertical que opera en régimen continuo y con flujo ascendente, es decir la alimentación entra por la parte de abajo del digestor y la salida se encuentra en la parte superior. Cuentan con una purga de lodos conectada a una parte inferior en forma de cono o cúpula. Este tipo de biodigestores también pueden ser de alimentación descendente.

La eficiencia de todos estos reactores está basada en la tendencia de las bacterias metanogénicas acerca de su fijación sobre superficies sólidas. Es por esto, que es conveniente utilizar filtros anaeróbicos que cumplan con esta función.

3.3.5.1 Reactor de flujo ascendente con filtro anaeróbico

En los sistemas de flujo ascendente con filtro anaeróbico la materia residual al entrar en el reactor se hace pasar a través de una capa de material poroso como por ejemplo gravas, carbón activado, ladrillos triturados, sepiolita, conchas marinas, materiales plásticos como anillos de PVC o poliuretano; silicatos como Saponitas, montmorillonita entre otros (GUEVARA V, 1996). Este método ocasiona que más bacterias metanogénicas se retengan dentro del biodigestor y que disminuya el tiempo de retención de la biomasa residual entre 0.5 – 4 días, esto conlleva a un incremento en la cantidad de materia a degradar. El volumen poroso ocupa entre 80 y 95% del volumen total del biodigestor (VARNERO M, 2011).

La entrada de la mezcla orgánica se ubica en la parte inferior, haciendo que su flujo sea ascendente y la materia que ya ha sido degradada sale del biodigestor por rebose en la parte superior. El fondo del biodigestor en forma cónica, acumula los lodos y de esta forma se extraen a cierto tiempo (**Ilustración 11: (A)**)

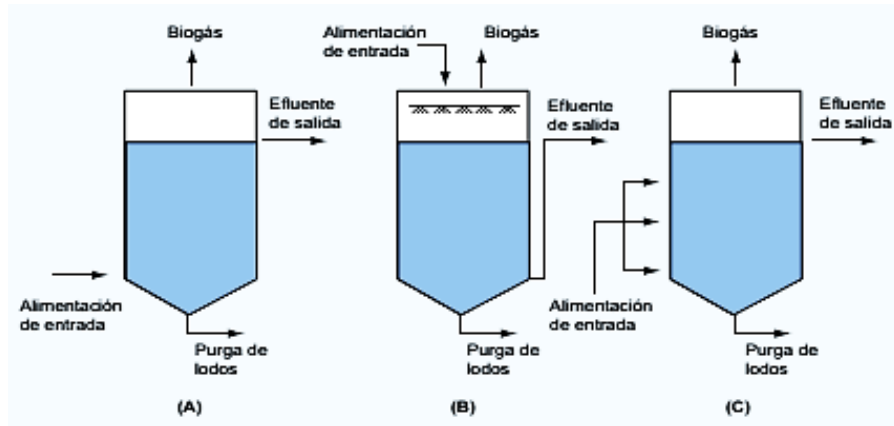


Ilustración 11. Reactores con filtro anaeróbico. A) De flujo ascendente. B) De flujo descendente. C) De alimentación múltiple. Fuente: (VARNERO M, 2011)

3.3.5.2 Reactor de capa de lodo granular (UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

Este tipo de reactor fue desarrollado en Holanda, aunque su estructura es muy simple tiene una eficiencia muy buena. Por lo regular se utiliza para el tratamiento de aguas residuales y funciona haciendo circular el fluido por la parte inferior del digestor, fluyendo así en sentido ascendente a través de una capa de gránulos o partículas biológicas. Entonces, el tratamiento se produce cuando el agua residual entra en contacto con estas partículas.

Cuando se produce el biogás en la parte inferior del sistema, empieza circular dentro y contribuye a la formación y mantenimiento de los gránulos biológicos, removiendo los lodos sedimentados y permitiendo así la interacción de estos con el agua residual. Parte de este gas se adhiere a las partículas biológicas y tanto el biogás libre como las partículas ascienden hacia la parte superior del digestor, donde se libera el biogás por medio de unos deflectores desgasificadores (ALTERCEXA, 2010).

Cuando el agua residual se encuentra en la parte superior del reactor, se dice que ha sido tratada y el efluente fluye por medio de un rebose. Una parte de estos de estos residuos se reconduce a la zona de lodo sedimentado (ver [Ilustración 12](#)).

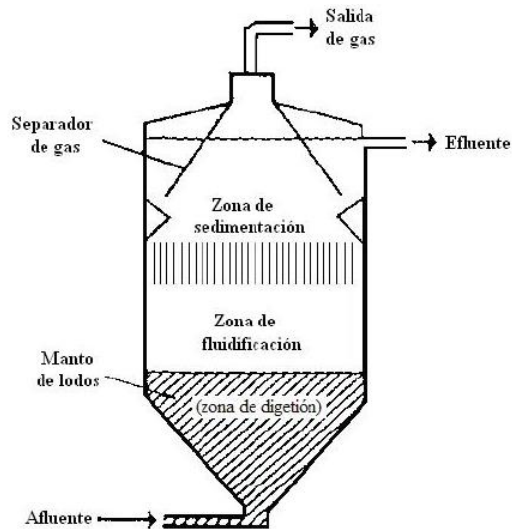


Ilustración 12. Biodigestor UASB.
(MENDEZ, CHAN, CASTILLO, VAZQUEZ, & ESPADAS, 2012)

3.3.6 Biodigestores de estructuras flexibles plásticas.

Comúnmente llamados “biodigestores de bolsa plástica” (**Ilustración 13**) es la forma más sencilla de producción de biogás, y consisten en un cilindro plástico hermético de color oscuro que funciona como reactor y gasómetro. En algunas ocasiones se construye el tanque con hormigón y la cúpula de polietileno. Un tanque de almacenamiento externo de polietileno es usado para abastecimiento.

El gas producido se almacena en la parte superior de la bolsa que por lo regular es el 25 % del volumen total del reactor (HERRERO, 2008). En el biodigestor, al principio la carga inicial tiene que ser el 75% del volumen del digestor, posteriormente se agregan cargas diarias de mezcla sustrato que al tener un peso produce que esta presión haga que por rebose salga la misma cantidad agregada en la tubería del otro extremo, a este efecto se le llama flujo pistón.

A diferencia de los otros tipos de digestores este sistema tiene un costo accesible para el área rural y ganadera, ya que los materiales con los que se le construye son de bajo costo. Respecto a la duración de los materiales, pueden llegar a tener un periodo de vida aproximado de 10 años. Por lo regular, la aplicación de estos biodigestores es para fines domésticos y de cocción de

alimentos, aunque no se descarta la posibilidad de usarse para iluminación o cualquier tipo de aplicación con necesidad térmica, como calentamiento de agua.

Se pueden considerar como digestores continuos, semicontinuos de pequeño y mediano tamaño. Opera a presiones bajas, y por lo regular la presión que debe tener el biogás para utilizarse en un quemador está en el rango de 5 – 25 mbar (VARNERO M, 2011). Aunque la presión de abastecimiento dependerá de la demanda de los distintos dispositivos de combustión de biogás. Una forma de aumentar la presión en este tipo de sistemas, es mediante una presión ejercida en el tanque de almacenamiento de polietileno; esto se puede lograr colocando encima objetos pesados hasta lograr la presión deseada.

Aproximadamente la presión está en el rango de 8 – 13 cm de columna de agua para usarse en quemadores estándar, aunque la presión se determina en base a cada tipo de fogón y sus características de funcionamiento, comúnmente se le da la presión empíricamente.

Se recomienda construir estos biodigestores de una forma semienterrada, esto para lograr mejor hermetismo, fijación de la bolsa y lo que se considera más importante, el aislamiento de la temperatura. También, cabe mencionar que entre más alargado se construya mayor será su eficiencia, ya que el recorrido de la materia prima hasta la salida será más largo y tendrá mayor contacto con los microorganismos que la degradan.

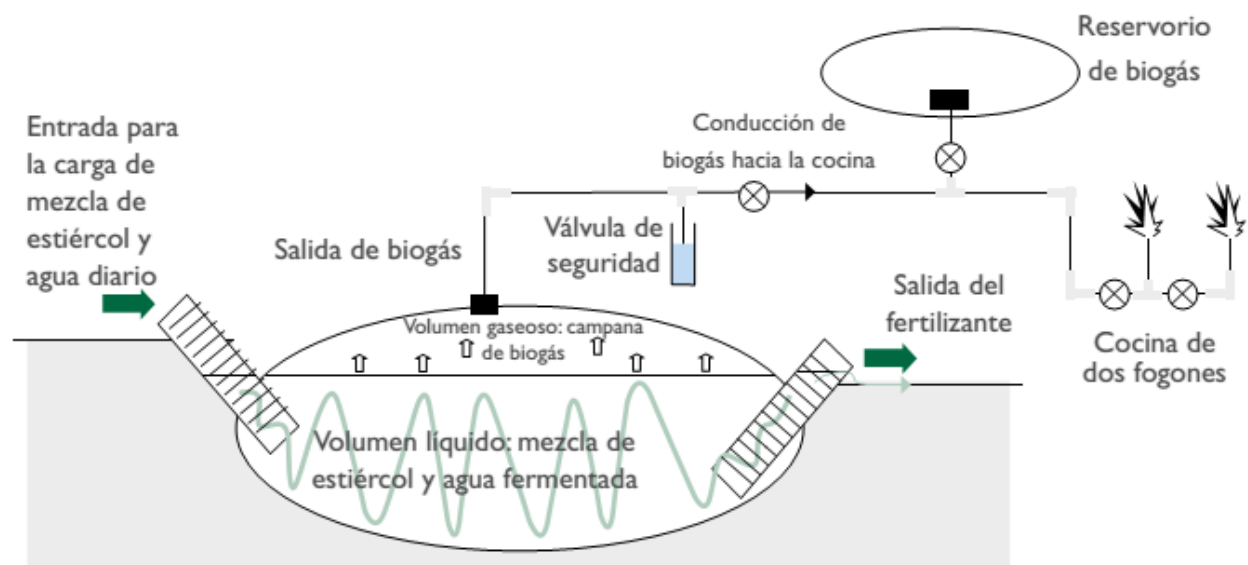


Ilustración 13. Biodigestor de bolsa de polietileno (HERRERO, 2008).

4 Productos de la digestión anaeróbica.

Son muchos los beneficios que conlleva la aplicación de la tecnología de biodigestores anaeróbicos, entre estos se encuentran impactos positivos hacia el medio ambiente, a la salud humana, reducción de residuos y sus costos de disposición final, además de obtener productos y subproductos con valor energético como es el caso del biogás y de nutrientes estabilizados que contiene el efluente que se utiliza como fertilizante natural, comúnmente llamado “Biol”.

En esta sección se dará a conocer a detalle las características del biogás y del biofertilizante. Estos productos se consideran de buen aporte energético y económico, si se utilizan adecuadamente.

4.1 Biogás

El biocombustible llamado biogás es una mezcla gaseosa que se produce en la digestión anaeróbica de residuos orgánicos, compuesto principalmente por Metano (CH_4 : 60 – 70%) y Dióxido de Carbono (CO_2 : 30 – 40%) (Tabla 13). Donde el gas de importancia calorífica es el Metano, por lo tanto entre mayor concentración de metano en la mezcla gaseosa, mejor será la calidad del biogás.

Tabla 13. Composición química aproximada del biogás
(OLAYA & GONZALEZ, 2009).

Componente	Composición aproximada (%)
Metano (CH_4)	60 – 70
Gas Carbónico (CO_2)	30 – 40
Hidrógeno (H_2)	1.0
Nitrógeno (N_2)	0.5
Monóxido de carbono (CO)	0.1
Oxígeno (O_2)	0.1
Ácido Sulfúrico (H_2S)	0.1

Para lograr una mayor cantidad de biogás se deben controlar los parámetros de la digestión anaeróbica en sus condiciones óptimas con respecto a la biomasa que se utiliza, como se explica

en la sección 2.1 y 2.2. Aunque en realidad es imposible predecir con exactitud la producción de biogás, ya que existen muchas variaciones.

Una composición promedio del biogás sería de 65% Metano y 35% Gas Carbónico, con una densidad de 0.72 kg/m^3 y 1.85 kg/m^3 respectivamente (VARNERO M, 2011). El resto de los gases que se encuentran en menor cantidad no se consideran de importancia para cálculos que se realizan en este documento, ya que por lo regular se filtran mediante distintos métodos para que el biogás sea más puro.

Es de gran importancia tener un buen contenido de metano en la mezcla, ya que con una concentración menor al 45% el biogás puede empezar a dejar de ser inflamable. El valor energético del biogás estará determinado por la concentración de metano, su poder calorífico esta alrededor de $20 - 25 \text{ MJ/m}^3$, comparado con $33 - 38 \text{ MJ/m}^3$ para el gas natural (PAREDES & BACA, 2005).

Una forma fácil de poder obtener mayor cantidad de metano se logra aumentando el tiempo de retención esto se debe a que en los primeros días de fermentación se produce más dióxido de carbono que metano y conforme se estabiliza el proceso se empieza a producir una concentración mayor de metano, de esta forma el biogás tendrá un poder calorífico mayor.

El valor calorífico del biogás es de 7 kWh/m^3 , comparado con el gas natural (10 kWh/m^3), el hidrogeno (3 kWh/m^3), se puede decir que es un biocombustible de buen poder calorífico y que es aceptable para su utilización. En la

Tabla 14 se muestran las características del biogás, como su densidad, límite de explosión y requerimiento de aire teórico para su correcta combustión.

Tabla 14. Características del biogás comparado con otros combustibles gaseosos (VARNERO M, 2011).

Valores	Biogás	Gas Natural	Gas Propano	Gas Metano	Hidrogeno
Valor Calorífico (kWh/m^3)	<u>7.0</u>	10	26	10	3
Densidad (ton/m^3)	<u>1.08</u>	0.7	2.01	0.72	0.09
Densidad con respecto al aire	<u>0.81</u>	0.54	1.51	0.55	0.07
Límite de explosión (% de gas en el aire)	<u>6 - 12</u>	5 - 15	2 - 10	5 - 15	4 - 80
Temperatura de encendido	<u>687</u>	650	470	650	585
Máxima velocidad de encendido en el aire (m/s)	<u>0.31</u>	0.39	0.42	0.47	0.43

Requerimiento teórico de aire (m³/m³)	<u>6.6</u>	9.5	23.9	9.5	2.4
--	------------	-----	------	-----	-----

Con un poder calorífico de 6.4 kWh/m³ se puede llegar a generar un calor equivalente a 22000 BTU/m³ (TAMAYO, 2009). El contenido de oxígeno para la explosión está en el rango de 6 – 12 % del volumen de gas a combustionar.

El biogás es un poco más liviano que el aire y posee una temperatura de inflamación de 700°C, y su llama puede alcanzar una temperatura de 870°C (CHACON, 2006).

El poder calorífico del biogás será distinto en todos los casos, ya que intervienen muchos parámetros en su producción y no siempre tendrá los mismos porcentajes en sus componentes, pero para fines de cálculos de dimensionamiento de biodigestores en este documento se considera un valor calorífico igual a 7 kWh/m³.

El biogás puede sustituirse por combustibles convencionales, aunque se necesite más cantidad para satisfacer la demanda energética, sin embargo, sigue siendo una buena opción ya que el costo de su producción solo involucra la construcción del sistema biodigestor. En este documento se utiliza la equivalencia con Gas L.P (Tabla 15). Se utiliza para determinar que tanto biogás se necesita para sustituir al Gas L.P.

Tabla 15. Equivalencia de biogás respecto a otros combustibles (CASTILLO, 2009)

1 m³ de Biogás	Diesel, Queroseno = 0.55 L
	Madera = 1.5 kg
	Carbón Vegetal = 0.8 kg
	Gas L.P = 0.45 kg
	Propano (Aprox. 25 kWh/m ³) – 0.24 m ³
	Gasolina = 0.61 L
	Carbón Mineral = 0.74 kg
	Alcohol carburante = 0.81 Lt

4.1.1 Purificación

Existen componentes no deseados en el biogás como son la humedad, Dióxido de Carbono (CO₂), Ácido Sulhídrico (H₂S). Pueden llegar a ocasionar dificultades en las tuberías de conducción de gas, corrosión u obstrucción, malos olores al momento de ser quemados, además de disminuir la eficiencia del biogás. En esta sección se muestran algunos métodos de purificación del biogás.

A continuación, en la **Tabla 16** se muestran los porcentajes y efectos de componentes sin valor calorífico que puede contener el biogás. Se necesitará purificar el biogás, dependiendo de la aplicación del mismo y de los materiales que se utilicen en la construcción.

Tabla 16. Componentes del biogás y sus efectos. (PEREZ, 2010).

Componente	Volumen	Efecto
CO₂	25 – 50%	A mayor porcentaje baja el poder calorífico
		A menor porcentaje incrementa el volumen de metano
		Causa corrosión
		Daña celdas alcalinas de combustible
H₂S	0 – 0.5%	Corrosión en equipos y tuberías de acero, cobre, bronce
		Emisiones de SO ₂ en combustión
		Emisiones de H ₂ S en combustión imperfecta
		Inhibición de la catálisis (dentro del digestor)
NH₃	0 – 0.05%	Emisión de NO _x
		Daño en celdas de combustibles
Agua condensada	1 – 5%	Corrosión en equipo y tubería
		Daños de instrumentación por condensado
		Riesgo de congelar y bloquear las tuberías y válvulas
Polvo	>5µm	Bloquea los conductos y celdas de combustible
N₂	0 – 5%	Baja el poder calorífico
Siloxenos	0 – 50 (mg/m ³)	Actúan como abrasivos, daño en motores

La humedad puede ser controlada con un filtro de silicato de silicio, se le conoce comercialmente como “Sílica Gel” y se muestra en la **Ilustración 14**. También, otra forma de controlarla es colocando arreglos en la tubería de conducción para que se acumule el agua condensada y después de un tiempo drenar el agua.



Ilustración 14. Silicato de silicio “Sílica Gel”. Imagen: (WIKIPEDIA, 2015).

El ácido sulfhídrico (H_2S) es un gas venenoso, se puede decir que es el principal causante de malos olores en el biogás y puede llegar a corroer las válvulas del sistema biodigestor y al momento de ser quemado en motores de combustión o en quemadores. Para filtrar el H_2S se utilizan filtros con óxido de hierro como rebabas de acero como se muestra en la **Ilustración 15**, también esponjas de acero o carbón activado.



Ilustración 15. Rebabas de acero que contiene los filtros de Ácido sulfhídrico. Imagen: (WIKIPEDIA, 2015)

En el caso de la eliminación del CO_2 se utilizan filtros de una solución de cal (CaO). Esto solamente se utiliza cuando se desea conducir el biogás a una red de gas natural o para

comprimirlo donde se tiene que tener una mezcla más purificada. Para el caso simple de energía eléctrica o térmica no es necesaria su filtración.

Otra impureza no deseada en el biogás son los siloxenos, que son variantes de la silicona y se presentan en el biogás producido con materias primas que contienen detergentes, tintas de impresión y en materiales de construcción, por lo regular se encuentran estos derivados de la silicona en los desechos domésticos, fangos de cloacas, vertederos o en plantas de tratamiento. Cuando se quema el biogás con siloxenos presentes se forma SiO_2 (Óxido de silicio) el cual se acumula en superficies de partes y maquinaria, en motores de combustión puede producir abrasión de los pistones.

4.1.2 Almacenamiento

Debido a que existen variaciones en la producción de gas en los biodigestores, se pueden compensar mediante depósitos de almacenamiento llamados “gasómetros”, teniendo la función adicional de abastecer directamente el biogás hacia el punto de uso.

El volumen del tanque depende de la tasa de producción de biogás y el consumo en un determinado tiempo. También, sirven para cubrir las tasas de consumo pico y para almacenarlo durante periodos de cero consumo.

Pueden ser de baja, media o alta presión. Los gasómetros de baja presión se encuentran en los biodigestores de cúpula fija, campana flotante donde la presión normalmente no supera los 50 mbar (CARMONA, 2008). En los biodigestores de polietileno tubular se utiliza el mismo material para almacenar el biogás y se consideran de baja presión, donde la presión depende de la aplicación y casi siempre se determina de forma empírica. Los gasómetros de media y alta presión manejan un rango de 8 – 10 bar con compresores para comprimir el biogás y almacenarlo en tanques de acero o de plástico reforzado.

En la **Ilustración 16**, se muestra una alternativa de almacenamiento del biogás de baja presión mediante un gasómetro plástico que no requiere que se comprima el biogás para almacenarlo. Funciona con un blower o bomba para almacenar o extraer el biogás.



Ilustración 16. Gasómetro plástico conectado a un blower. (CERTIC Energia, 2015).

Existen muchos tipos de gasómetros, pero sin duda los más durables y económicos son los gasómetros plásticos, ya que no se corroen y son flexibles.

Los gasómetros se clasifican según la presión que estarán manejando. La presión también determina que materiales utilizar para que el contenedor del biogás resista y sea seguro para manejar cierta presión (**Tabla 17**).

Tabla 17. Clasificación de los gasómetros respecto a su presión de operación. (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008)

Tipo	Presión	Volumen usual (m ³)	Diseño
Baja presión	10 – 50 mbar	5 – 2	Cúpula flotante en biodigestor
	0.05 – 5 mbar	10 - 200	Bolsa plástica
Media presión	5 – 20 bar	1 - 100	Tanque de acero presurizado
Alta presión	200 – 300 bar	0.1 – 0.5	Contenedor de acero

El tamaño y la presión se determinan en base a la demanda de gas de los sistemas de combustión. Para determinar la presión del tanque intervienen factores como la demanda del equipo de combustión y el tiempo deseado que estará quemándose el biogás. Es importante mencionar, que en base al volumen del tanque de almacenamiento se debe calcular el tamaño de biodigestor y la cantidad de producción de biogás al día, ya que esto sería una limitante para el gasómetro y el tiempo de uso del biogás.

Por ejemplo, para usos domésticos se recomienda una presión de 5 – 20 cm de columna de agua, en cambio una lámpara de biogás requiere aproximadamente 10 cm de columna de agua. (SASSE, 1988).

4.1.3 Usos

El aprovechamiento del biogás está relacionado con el uso que se le puede dar como combustible para generación de electricidad o para generación de energía térmica. Cabe mencionar que el biogás no siempre tendrá condiciones adecuadas para hacer funcionar a algunas aplicaciones, entonces al momento de buscarle un uso adecuado se tiene que realizar un análisis de los componentes del biogás y de qué forma interactúan con la aplicación y posteriormente evaluar si se debe purificar, aunque no en todos los casos es necesario una purificación del biogás, siempre será un paso necesario para tener una mejor eficiencia en la combustión.

Algunos usos que se le puede dar al biogás se muestran en la [Ilustración 17](#).

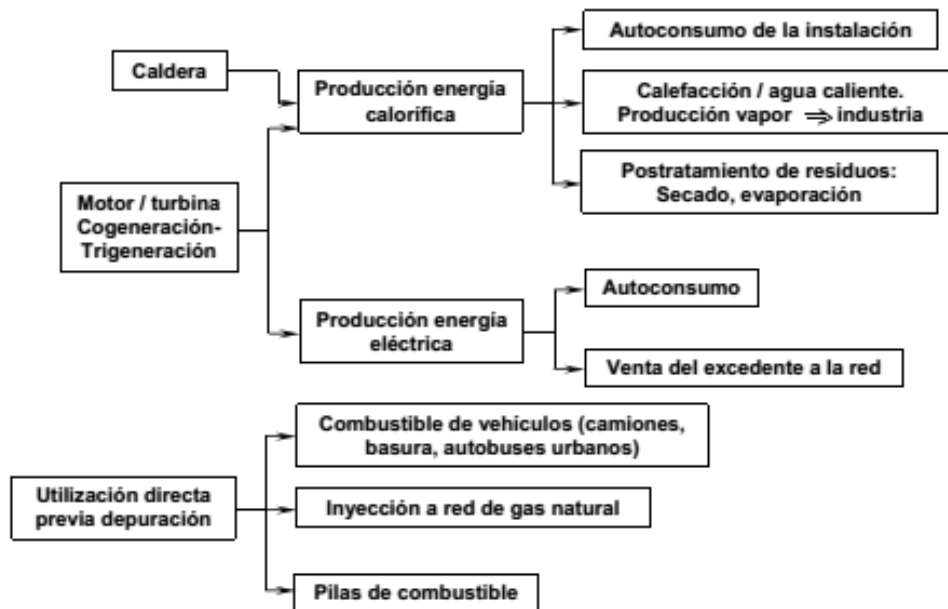


Ilustración 17. Usos del biogás.

Para cada caso específico el biogás tiene que tener un tratamiento antes de llevarlo a su combustión, como se explica en la sección 4.1.1

Conociendo el consumo de biogás de las aplicaciones se puede determinar que tanto biogás se quiere tener disponible en un cierto periodo de tiempo según la necesidad, y por consiguiente el volumen del tanque de abastecimiento.

A continuación, en la **Tabla 18** se pueden apreciar algunas aplicaciones con su consumo de biogás aproximado, aunque es preferible conocer las especificaciones y el consumo real de la aplicación que se utilizará realmente.

Tabla 18. Consumo de biogás aproximado y sus características (6.4 kWh/m³) (DE LA CRUZ, 2009).

Aplicación	Características	Potencia calorífica aprox. (kcal/hr)	Consumo de biogás (m ³ /hr)
Cocina	Quemador chico	1000 – 1250	0.18 – 0.23
	Quemador mediano	1500 – 1750	0.27 – 0.32
	Quemador grande	Min: 2000	0.36
Calefactores	Caudal de 8 L/min	11500 – 12500	2.00 – 2.30
	Caudal de 10 L/min	13250	2.40
	Caudal de 12 L/min	15250 – 16250	2.77 – 2.95
	Caudal de 14 L/min	19500 – 20500	3.54 – 3.72
	Caudal de 16 L/min	23500 – 25000	4.27 – 4.54
Tanque Térmico	Capacidad 75 L	4500	0.82
	Capacidad 120 L	5000	0.91
	Capacidad 150 L	6000	1.10
Refrigerador (ciclo de absorción)	Uso normal x pie ³ de cap.	55.00	0.01
	Uso máximo x pie ³ de cap.	96.00	0.018

4.2 Biofertilizante “Biol”

El estiércol depositado directamente en el suelo no resulta conveniente, ya que produce una alta concentración orgánica que en vez de ser abono es perjudicial para la tierra.

El nitrógeno contenido se filtra a través del suelo y en contacto con el agua subterránea se oxida y permanecerá en forma de nitrato que no resulta conveniente (LEON, BARRANTES, & CANDIA, 2012).

Los residuos ya tratados salen del digestor conteniendo nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio que hacen que el efluente se pueda aplicar como fertilizante, mejorando la calidad del suelo y de las plantas.

La composición promedio del biol es la siguiente: 8.5% materia orgánica, 2.6% nitrógeno, 1.5% fosforo, 1% potasio. No tiene mal olor ni bacterias patógenas y puede ser aplicado directamente en el campo en forma líquida o sólida.

Se ha comprobado que un metro cúbico de bioabono aplicado diariamente, puede llegar a fertilizar más de dos hectáreas de suelo (OLAYA & GONZALEZ, 2009). Se ha determinado que existen aumentos en el rendimiento de las cosechas y mejoramiento en las propiedades del suelo en comparación con los fertilizantes químicos que a largo plazo afecta las propiedades de los suelos.

5 Estado del arte

5.1 Usos en el mundo

Los biodigestores para tratar residuos orgánicos y el biogás que estos producen como fuente de energía renovable empieza a tomarse más en cuenta y a utilizarse con más frecuencia en estos últimos años en el mundo, ya que tal vez sea una de las tecnologías de fácil implementación en sectores rurales y agrícolas con grandes cantidades de residuos orgánicos, y que a su vez es donde la escasez energética ocurre con más frecuencia, además que se tiene una problemática al momento de la disposición final de los desechos orgánicos que terminan contaminando al ambiente.

La frecuente utilización de biodigestores en estos últimos años en el mundo, es una muestra que la descontaminación con este tipo de tecnologías es una realidad y trae muchos beneficios considerables.

Países como China, India, Bolivia, Inglaterra, Alemania, Estados Unidos entre otros encontraron un gran beneficio en la aplicación de biodigestores de fermentación anaeróbica para obtener biogás y disminuir el impacto ambiental, evitando que se contaminen cuencas o ríos cercanos, mejorando la calidad del aire y beneficios a la salud humana de las personas que viven alrededor.

En Alemania para el año 2011 se tenían registrados 6800 biodigestores funcionando, siendo así el país con más biodigestores construidos en la unión europea como lo indica la gráfica de la **Ilustración 18**.

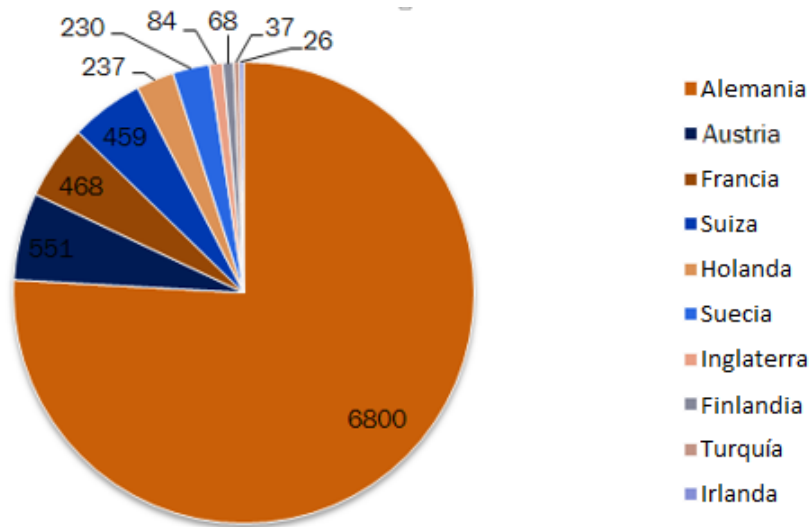


Ilustración 18. Gráfica de número de biodigestores anaeróbicos operando en algunos países europeos.
(Fuente: Center for climate and energy solutions: Country Report of Member Countries, Istanbul, April 2011. IEA Bioenergy)

En países de Sudamérica ha tenido éxito la implementación de biodigestores de bajo costo para comunidades rurales, en donde se sustituye la cocción de alimentos con quema de madera y carbón por cocinas de biogás, evitando así daños pulmonares en los habitantes.

5.1.1 China

China se considera como uno de los países líderes productores de biogás en el área rural para uso familiar, pero también existen empresas que se especializan en desarrollar proyectos a gran escala para la industria, y sistemas centralizados de generación para aldeas enteras, donde todo el estiércol generado en cuencas lecheras se transporta hasta la planta de biogás donde se genera el biocombustible y se distribuye hasta las viviendas. También lo utilizan como biocombustibles para automóviles, purificando y comprimiendo el biogás, logran almacenarlo y venderlo en estaciones de servicio.

En la Aldea de Doudian en China se construyó un sistema centralizado de digestión anaeróbica para los residuos que se generan en el Distrito Fangshan en Beijing. Con un Volumen de

Biodigestor Total de 1100 m³ y tratando 44 Tons. de mezcla de estiércol diarias (DE LA GUERRA, 2011) (**Ilustración 19**).



Ilustración 19. Sistema centralizado de producción de biogás: Beijing Distrito de Fangshan, Aldea de Doudian. (DE LA GUERRA, 2011).

5.1.2 Estados Unidos.

El programa gubernamental de la Environmental Protection Agency (EPA) llamado AgStar promueve la recuperación de metano de distintos residuos de animales, además de alentar a las universidades para que realicen trabajos de investigación acerca de la digestión anaeróbica, puesto que se busca cada vez más una mejor eficiencia en la tecnología por medio de procesos integrados de mejoras. AgStar ha desarrollado 260 proyectos de digestión anaeróbica hasta 2014.

5.1.3 Austria.

En Austria la empresa Entech Biopower, ha realizado un diseño y construcción de una planta procesadora de desechos de restaurantes en Hamburgo-Alemania (**Ilustración 20**).



Ilustración 20. Planta de tratamiento de residuos orgánicos de restaurantes en Austria. (MONCAYO, 2011).

5.1.4 Costa Rica

En países latinoamericanos se utilizan bastante los biodigestores para el área rural como en el caso de Costa Rica en la región de Alajuela en la granja Dos Pinos donde se construyeron dos biodigestores de 66 pies de largo por 8.2 pies de diámetro, conectados en serie y que son parte integral de un sistema de ciclo cerrado (**Ilustración 21**). Se utilizan para generación de electricidad, compostaje y se obtienen aproximadamente 300,000 galones anuales de biofertilizante (HOJNACKI, LI, KIM, MARKGRAF, & PIERSON, 2011).



Polyethylene tube biodigester

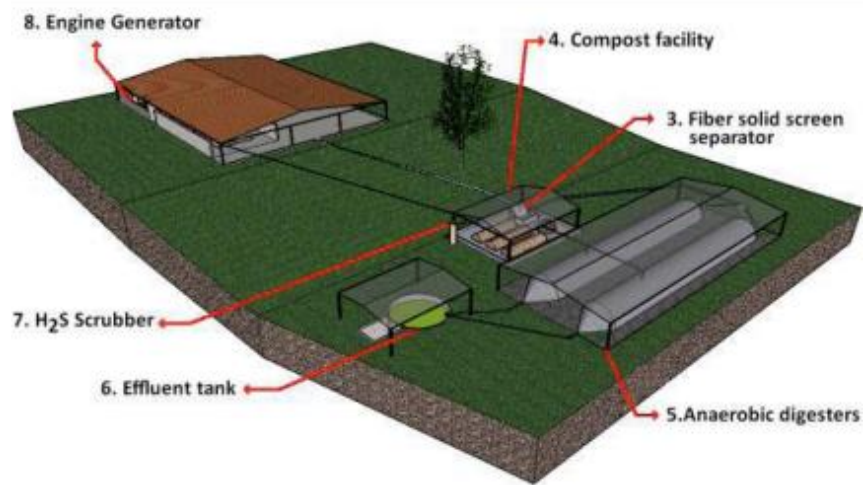


Diagram of the integrated system

Ilustración 21. Biodigestores tubulares de polietileno conectados en serie, Costa Rica. (HOJNACKI, LI, KIM, MARKGRAF, & PIERSON, 2011).

5.1.5 México

En México se contaba con un comité que surgió a raíz del acuerdo internacional “El protocolo de Kyoto”. El Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y Captura de Gases de Efecto Invernadero (COMEGEI) se encargaba de promover, aprobar, apoyar y dar seguimiento a proyectos de reducción de emisiones de GEI. Éste, buscaba reducir las emisiones de bióxido de carbono equivalente (CO₂e) en base a gases de efecto invernadero que se generan en las industrias. El COMEGEI financió proyectos en varios estados del país, un total de 88 proyectos relacionados con el manejo de residuos en granjas porcinas del país (COMEGEI, 2010). En la actualidad este comité ha dejado de publicar información en el sitio web oficial del gobierno y ya no se escucha de él en los medios de comunicación.

Existe una empresa llamada Bioenergía de Nuevo León S.A de C.V, que desarrolló una planta aprovechando el biogás que se genera en rellenos sanitarios. La planta consiste en la extracción del biogás mediante perforaciones de pozos, que a su vez se conectan a tuberías centrales que lo dirigen hacia la combustión de generación de electricidad (SEISA, 2015)

Por otro lado, se tiene registrado que la empresa BIOGEMEX desde el 2009 hasta 2012 ha construido cerca de 56 biodigestores en establos, de los cuales 9 procesan estiércol porcino, 1 de residuos industriales orgánicos y 46 de estiércol bovino (BIOGEMEX, 2015).



Ilustración 22. Biodigestor, Proyecto de BIOGEMEX en Joane, León, Guanajuato. (BIOGEMEX, 2015).

Actualmente en Baja California, la empresa Bona Carne ubicada en Mexicali en asociación con Baja Light & Power, planean implementar un biodigestor con capacidad de 7 MW tratando el estiércol de 47,000 vacas. Con la energía eléctrica que se producirá brindarán autoabastecimiento de energía eléctrica a Bona Carne y a escuelas cercanas (CEE, 2013).

6 Metodología

El dimensionamiento de un biodigestor es algo complejo ya que intervienen distintos factores que se derivan de otros. Para poder realizar un cálculo de dimensionamiento se tiene que llevar una buena metodología y sobre todo conocer el factor principal que será la base y el inicio del cálculo.

Los siguientes métodos se utilizan para iniciar un cálculo de dimensionamiento de biodigestores y calcular su producción de biogás:

a) Dimensionamiento por demanda de biogás o biofertilizante

Cuando la cantidad de materia prima a degradar no es una limitante, se puede estimar la demanda energética mediante un levantamiento de datos de los equipos de combustión y saber que tanto biogás demandan en un tiempo determinado, a partir de ahí se calcula el tamaño de biodigestor y determinar de qué tipo es la mejor opción.

b) Dimensionamiento por materia prima disponible

Considerando la cantidad de sustrato disponible y afluente que se genera se determina el volumen del reactor, después se calcula la energía obtenida en cantidad de biogás, posteriormente se analiza donde se utilizará el biogás y se determina donde es más factible su uso.

6.1 Ubicación

El biodigestor que se describirá más a detalle en este documento, se ubicará en Valle de las Palmas, Tijuana B.C, zona en la cual predomina el sector ganadero y por ende abundancia en los recursos necesarios para hacerlo funcionar. Cabe mencionar que para estos sistemas siempre se debe asegurar la materia prima, es decir que es necesario tener disponibilidad de estiércol en el sitio de ubicación. Antes de realizar un dimensionamiento de un biodigestor se deben analizar las condiciones que presenta el lugar donde se planea construir.

Es importante saber a qué factores climáticos estará expuesto el sistema de digestión y que por consiguiente darse cuenta si su funcionamiento no se verá afectado. También de estas condiciones se dependerá para decidir con que materiales estará construido para que resista y no se deteriore tan rápido.

Algunas de estas condiciones que pueden afectar la construcción del biodigestor pueden ser la radiación solar y fuertes vientos. En el área de estudio donde estará construido el biodigestor experimental (que se dimensiona en este documento), predominan fuertes vientos y buena radiación solar. Entonces conociendo esto se toman medidas de construcción adecuadas para que el biodigestor sea durable y no se dañe.

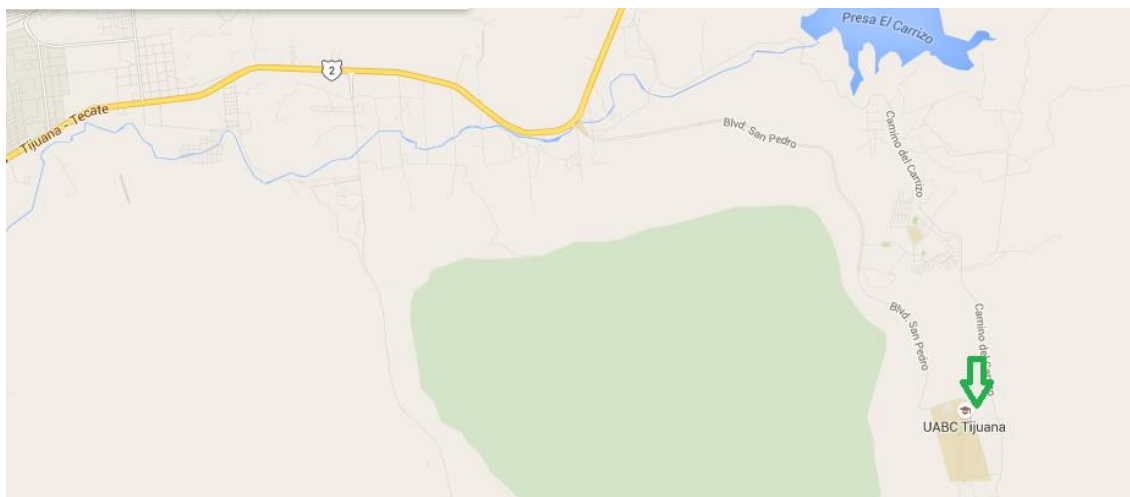


Ilustración 23. Ubicación: Valle de las Palmas, Tijuana B.C.

6.2 Memoria de cálculo: Método de dimensionamiento por demanda de biogás.

En esta sección se realiza el dimensionamiento de un biodigestor para degradar estiércol bovino y brindar abastecimiento de biogás a un quemador marca “Rupak Enterprises” (Ver en: Anexo 1) con 4 horas de uso diario definido por el usuario. “Rupak Enterprises” es un proveedor de quemadores a base de biogás específicamente.

Conocer esta información es importante para iniciar el cálculo mediante este método, ya que conociendo la aplicación y sus especificaciones podemos determinar que tanto biogás demanda en un periodo de tiempo, que en este caso son 4 horas.

A continuación, se definen los parámetros de diseño del biodigestor, donde la temperatura promedio de operación se tomó de la Estación Meteorológica de UABC ubicada en el área de Valle de las Palmas, Tijuana B.C.

Tabla 19. Parámetros de diseño del biodigestor experimental.

Parámetro	Definición
Tipo de biodigestor	Biodigestor de estructura plástica de polietileno (Tubular)
Tipo de materia prima	Estiércol fresco de ganado vacuno
Temperatura promedio de operación (Dato tomado de la Estación Meteorológica de UABC ECITEC)	23.06 °C
Tiempo de retención ($TR_{@ 23.06^{\circ}C}$) (Tabla 10)	30 Días
Uso del biogás producido	Doméstico (1 Tanque de 10 kg Gas L.P. al mes)
Tipo de solución para el sustrato	Agua

6.2.1 Cálculo de demanda de biogás

La demanda de biogás se calcula en base al uso de Gas L.P utilizado en una vivienda. En este caso de estudio se consume 1 tanque pequeño de 10 kg de Gas L.P durante aproximadamente 1 mes.

En la **Tabla 15** se muestra la equivalencia de $1 \text{ m}^3 \text{ de biogas} = 0.45 \text{ kg de Gas L.P.}$ Entonces, se calcula la demanda de biogas de la siguiente manera:

$$\text{Demanda de biogas (DB)} = (10 \text{ kg de Gas L.P.}) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{0.45 \text{ kg de Gas L.P.}} \right) = 22.22 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} = \mathbf{0.74 \text{ m}^3/\text{día}}$$

Teóricamente, necesitamos tener disponible 0.74 m^3 de biogás al día, pero debemos considerar que muchas veces no se utilizará el tiempo estimado.

Para evitar este tipo de variaciones se le añadirá un factor de volumen extra del 20% del volumen total. Este factor de volumen extra tendrá sus variaciones en cada caso específico y de las condiciones de uso del biogás. Otra de las razones de añadir este factor de volumen es porque nunca se querrá dejar el tanque con menos del 20% de su volumen, y también que la producción de biogás en el biodigestor durante el día tendrá sus variaciones a distintas temperaturas de operación.

Entonces, la demanda de biogás nos queda de la siguiente manera:

$$\text{Demanda de biogas(DB)} = (0.74 \text{ m}^3)(0.20) + 0.74 \text{ m}^3 = \mathbf{0.9 \text{ m}^3 \text{ de biogas/día}}$$

6.2.2 Cantidad de materia prima requerida

En este punto es necesario conocer qué tipo de materia prima se va a utilizar en el biodigestor, ya que para poder producir esa cantidad de biogás se necesita tener conocimiento de los sólidos totales que contiene la materia.

Se utiliza estiércol fresco de ganado bovino con un contenido de $0.20 \text{ kg de sólidos totales/kg de estiércol fresco}$ (Ver: **Tabla 6**), a una temperatura de operación de 23.06°C (Ver sección: 6.2 y **Tabla 19**).

La **Tabla 11** indica, que la temperatura de operación se encuentra en medio de dos valores ya conocidos, entonces calculamos con una interpolación lineal la cantidad de biogás producida a la temperatura deseada:

0.16 m ³ de Biogás	@ (22°C y Pr. Atm.)
X	@ (23°C y Pr. Atm.)
0.2 m ³ de Biogás	@ (25°C y Pr. Atm.)

El resultado de la interpolación lineal queda:

$$\mathbf{Biogas}_{@T=23^\circ\text{C}, ST=0.20} = 0.16 \text{ m}^3 + \frac{23^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}}{25^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}} (0.2 \text{ m}^3 - 0.16 \text{ m}^3) = 0.173 \text{ m}^3$$

Para conocer que cantidad de estiércol se requiere para producir esa cantidad de biogás a las condiciones mencionadas, se obtiene con la siguiente formula, que involucra la demanda total de biogás y el biogás que se produce a una temperatura de $T= 23^\circ\text{C}$ y con 20% de sólidos totales.

$$\mathbf{Estiércol fresco requerido(EFR)} = (\text{demanda de biogas}) \left(\frac{1 \text{ kg estiércol fresco}}{ST} \right) \left(\frac{1 \text{ kg ST}}{\text{Biogás producido @ T, ST}} \right) \quad (4)$$

$$\text{Estiércol fresco requerido (EFR)} = \left(0.9 \text{ m}^3 \text{ de } \frac{\text{biogas}}{\text{día}}\right) \left(\frac{1 \text{ kg estiércol fresco}}{0.2 \text{ kg ST}}\right) \left(\frac{1 \text{ kg ST}}{0.173 \text{ m}^3}\right)$$

$$\text{Estiércol fresco requerido (EFR)} = 26 \text{ kg de estiércol fresco/día}$$

6.2.3 Concentración de la carga diaria

La carga diaria para el biodigestor tiene que tener una cierta concentración (Ver sección: 2.1.2). Para este caso se utiliza una concentración de sustrato al 12%, y para obtener la cantidad de agua que se tiene que agregar para tener una mezcla al 12% de sustrato se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ Sustrato} = \frac{(1 \text{ Kg. excreta})(\text{ST en excreta fresca})}{(1 \text{ Kg excreta fresca}) + (\text{Agua agregada (W)})} \quad (5)$$

$$\text{Sustrato al 12\%} = \frac{(1 \text{ Kg. excreta})(0.20 \text{ ST en excreta fresca})}{(1 \text{ Kg excreta fresca}) + (\text{Agua}_{@ 12\% \text{ sustrato}})}$$

Despejando obtenemos:

$$0.20 = 0.12 + (0.12)(\text{Agua}_{@ 12\% \text{ sustrato}})$$

$$\text{Agua}_{@ 12\% \text{ sustrato}} = \frac{0.08}{0.12} = 0.667 \text{ L de } \frac{\text{agua}}{\text{kg. excreta fresca}}$$

$$\text{Cantidad de agua a agregar (AA)} = (\text{EFR})(\text{Agua}_{@ 12\% \text{ sustrato}}) \quad (6)$$

$$\text{Cantidad de agua a agregar (AA)} = \left(26 \text{ kg de estiércol } \frac{\text{fresco}}{\text{día}}\right) \left(0.667 \text{ L de } \frac{\text{agua}}{\text{kg. excreta fresca}}\right)$$

$$\text{Cantidad de agua a agregar (AA)} = 17.342 \text{ L de agua/día}$$

Como ya se conoce la cantidad de estiércol fresco necesario y la cantidad de agua, se calcula la carga diaria de mezcla estiércol-agua:

$$\mathbf{Carga\ diaria(CD) = EFR + (AA)} \quad (7)$$

$$\mathbf{Carga\ diaria(CD) = \left(26\ kg\ de\ estiercol\ \frac{fresco}{día}\right)\left(\frac{1\ L}{1\ kg}\right) + 17.342\ L\ de\ agua}$$

$$\mathbf{Carga\ diaria(CD) = 43.32\ L = 0.04\ m^3\ mezcla\ estiercol - Agua}$$

6.2.4 Volumen del biodigestor

Conociendo la cantidad de biogás necesaria para satisfacer la demanda y la cantidad de mezcla de carga diaria que la produce, es cuando nos damos cuenta que tipo de biodigestor podemos usar. En este caso se opta por un biodigestor flexible de polietileno tubular (Ver sección: 3.3.6), ya que la cantidad de biogás necesaria corresponde a biodigestores pequeños, y dada su aplicación se busca que sea de bajo costo. Además de que se cuenta con espacio suficiente para poder implementar esta tecnología en la zona de estudio.

El volumen total del biodigestor tubular de polietileno contendrá una parte líquida (Estiércol con agua) y una gaseosa (Biogás) contenida en el gasómetro. En este caso el diseño requiere un espacio aproximado del 65 - 75% del volumen total a la fase líquida, y el resto a la fase gaseosa.

El volumen total del reactor viene dado por la siguiente fórmula:

$$\mathbf{V_T = V_G + V_L} \quad \rightarrow \text{Donde: } \mathbf{V_G: Volumen del gasómetro}$$

$$\mathbf{V_L: Volumen de la mezcla estiercol - agua}$$

$$\mathbf{V_T: Volumen total del biodigestor}$$

El volumen que ocupara la mezcla dentro del biodigestor se calcula con la fórmula (3) :

$$V_L = (\text{Carga Diaria})(TR_{@ 23.06^\circ\text{C}})$$

$$V_L = (0.04 \text{ m}^3)(30 \text{ Dias}) = 1.2 \text{ m}^3$$

Y como ya se había calculado el volumen de biogás que necesita producir el biodigestor al día, el volumen total V_T queda:

$$V_G = 0.9 \text{ m}^3 \quad \rightarrow \quad V_T = 1.2 \text{ m}^3 + 0.9 \text{ m}^3 = 2.1 \text{ m}^3$$

Entonces, de esta forma tenemos dimensionado el volumen aproximado del biodigestor ya que las variaciones de los parámetros de temperatura, del consumo de biogás y variaciones en composición de materia orgánica y comportamiento de las bacterias nunca serán constantes.

La bolsa de polietileno utilizada tiene 0.8 m de diámetro. Conociendo lo anterior, dada su forma cilíndrica se puede encontrar fácilmente la longitud de la cámara de digestión con la siguiente operación.

$$L = \frac{V_T}{\pi r^2} \quad (8)$$

$$L = \frac{2.1 \text{ m}^3}{(3.1416)(0.4 \text{ m})^2} = \frac{2.1 \text{ m}^3}{0.502656 \text{ m}^2} = 4.177 \text{ m de largo}$$

6.2.5 Volumen del tanque de almacenamiento

El volumen del tanque de almacenamiento depende de la producción de biogás diaria y el consumo de la aplicación. Debe ser diseñado para cubrir la tasa de consumo pico y también para que almacene el biogás durante los periodos de cero consumo.

Para poder empezar los cálculos, se debe conocer que tanto biogás demandan los equipos de combustión, en este caso se utilizara un quemador simple marca “Rupak Enterprises” que demanda $0.225 \text{ m}^3 \text{ de biogás/hr}$ (Ver Anexo 1). También es necesario conocer que tanto tiempo se estará utilizando el quemador aproximadamente.

El quemador se estará utilizando 3 hr/día . Entonces, el consumo aproximado diario del quemador será:

$$\frac{\text{Consumo del quemador}}{\text{día}} = (\text{Demanda de biogas del quemador})(\text{Horas de funcionamiento al dia}) \quad (9)$$

$$\frac{\text{Consumo del quemador}}{\text{día}} = \left(0.225 \text{ m}^3 \text{ de } \frac{\text{biogás}}{\text{hr}}\right)(3 \text{ hr}) = 0.675 \text{ m}^3 \text{ de biogás}$$

Teóricamente se necesita un tanque de 0.675 m^3 , pero para tener un margen de seguridad debido a las variaciones respecto a las horas de uso se le aumentará el volumen al tanque un 20% del volumen teórico, entonces el volumen total del tanque queda:

$$V_{\text{tanque}} = (0.675 \text{ m}^3)(0.20) + 0.675 = 0.81 \text{ m}^3$$

La bolsa de polietileno utilizada tiene 0.8 m de diámetro. Conociendo lo anterior, dada su forma cilíndrica se puede encontrar fácilmente la longitud del tanque con la formula (8).

$$L = \frac{0.81 \text{ m}^3}{(3.1416)(0.4 \text{ m})^2} = 1.611 \text{ m de largo}$$

6.2.6 Cálculo de presión en el tanque de abastecimiento

En esta parte se determina la presión que se requiere tener en el tanque para que el gas sea conducido en la medida que demanda el quemador seleccionado. Para esto aplicaremos el “Teorema de Bernoulli” que expresa que en un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) en circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido. La energía de un fluido en cualquier punto consta de tres componentes: Energía cinética, Energía potencial gravitacional, y la energía de flujo debido a la presión.

Se considera que en este caso el gas se comporta como un fluido incompresible ya que es de baja presión sin cambio de fase. También se considera que el proceso se aproxima a un sistema ideal; esto quiere decir que el gas no tendrá fricción significativa en su conducción.

En realidad lo que buscamos para este diseño en particular es el peso que ejercerá una presión en la parte superior del tanque de almacenamiento de polietileno, actuando así como un émbolo que empuja hacia abajo. Además, podemos decir que no tendrá movimiento horizontal, ya que el tanque estará dentro de una guía fija que hará que no se deforme fuera de ella cuando se le ponga el peso.

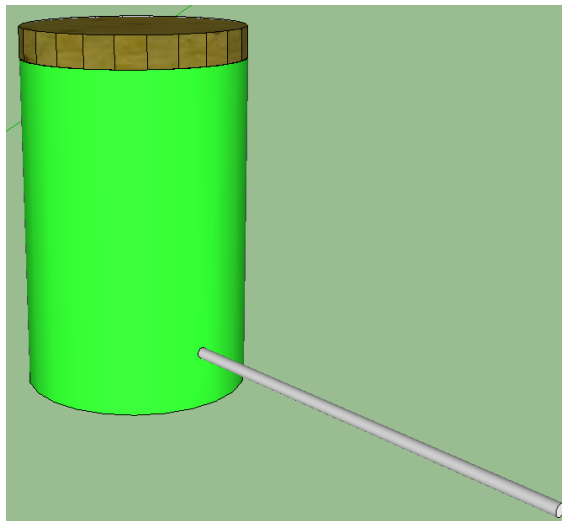


Ilustración 24. Esquema ejemplo del tanque de almacenamiento (En color café el peso añadido para ejercer presión).

Para iniciar el cálculo utilizaremos la ecuación del “Teorema de Bernoulli”, y se escribe de la siguiente forma:

$$P_{atm} + P_{peso} + P_{biogas} + \rho g h_{tanque} + \frac{1}{2} \rho v_{tanque}^2 = P_{atm} + P_{quemador} + \rho g h + \frac{1}{2} \rho v_{tuberia}^2 \quad (10)$$

Donde:

P_{peso} = La presión que ejerce el objeto sobre el tanque

$P_{biogás}$ = Presión del biogás contenido en el tanque

ρ = densidad del biogás

g = constante de aceleración gravitatoria (9.81 m/s²)

h_{tanque} = Altura del tanque (desde el punto donde estará ubicado el peso hasta la conexión de la tubería

$h_{tanque} = 1.34 \text{ m}$

v_{tanque} = velocidad de conducción del biogás dentro del tanque (Se desprecia ya que es insignificante)

$P_{quemador}$ = La presión del regulador del quemador

h = altura de la tubería (se desprecia porque la tubería no tiene una altura, ni caídas)

$v_{tuberia}$ = Velocidad del biogás en la tubería para cubrir la demanda del quemador

Para poder obtener el resultado de (P_{peso}), se tiene que encontrar las demás incógnitas.

Para calcular la densidad del biogás necesitamos conocer la densidad del CH₄ y del CO₂ que contiene. Se utilizará una composición de 65% de CH₄ y 35% de CO₂, porcentajes del volumen total de biogás.

Tenemos que las densidades de CH₄ y del CO₂ son:

- $\rho_{CH_4(1.013 \text{ bar y } 15^\circ\text{C})} = 0.6797 \text{ kg/m}^3$ (INDURA, 2006)
- $\rho_{CO_2(1.013 \text{ bar y } 15^\circ\text{C})} = 1.8714 \text{ kg/m}^3$ (INDURA, 2006)

Utilizaremos la siguiente fórmula (CENGEL & BOLES, 1996), así podemos encontrar la masa de cada compuesto:

$$m = \rho \cdot V \quad (11)$$

$$m_{CH_4} = \rho_{CH_4} \cdot V_{CH_4}$$

$$m_{CH_4} = \left(0.6797 \frac{kg}{m^3}\right) ((0.81 m^3)(0.65)) = 0.3578 kg$$

$$m_{CO_2} = \rho_{CO_2} \cdot V_{CO_2}$$

$$m_{CO_2} = \left(1.842 \frac{kg}{m^3}\right) ((0.81 m^3)(0.35)) = 0.5222 kg$$

En base a la ecuación (10), despejando encontramos la densidad del biogás:

$$\rho_{Biogas} = \frac{m_{CH_4} + m_{CO_2}}{V_T} \quad (12)$$

$$\rho_{Biogas} = \frac{(0.3578 kg + 0.5222 kg)}{0.81 m^3} = 1.0864 kg/m^3$$

A continuación, se calcula la presión del biogás en el depósito por medio de la siguiente formula (CENGEL & BOLES, 1996):

$$P_{biogas} = (n_{CH_4} + n_{CO_2}) \left(\frac{R \cdot T_{prom}}{V_T}\right) \quad (13)$$

Para poder encontrar la presión del biogás en el depósito sin el peso, se necesita calcular el número de moles de cada compuesto con la siguiente formula (FELDER & ROUSSEAU, 2004):

$$n = \frac{m}{M} \quad (14)$$

$$n_{CH_4} = \frac{357.8 g}{16 g/mol} = 22.36 mol CH_4$$

$$n_{CO_2} = \frac{522.2 g}{44 g/mol} = 11.86 mol CO_2$$

Sustituimos valores en la ecuación (12) y así obtenemos la presión del biogás contenido en el tanque:

$$P_{biogas} = (22.36 \text{ mol } CH_4 + 11.86 \text{ mol } CO_2) \left(\frac{(8.3144 \text{ m}^3 \cdot \frac{Pa}{K} \cdot \text{mol})(298.15 \text{ K})}{0.81 \text{ m}^3} \right) - P_{atm}$$

$$P_{biogas} = 104.0542 \text{ kPa} - 101.32 \text{ kPa} = 2.732 \text{ kPa} = 27 \text{ mbar}$$

Se necesita vencer la presión atmosférica para que el recipiente se llene de biogás, por lo tanto, se está considerando que dentro del tanque el gas producido trae consigo una adición de presión atmosférica. En este caso se le restará esa presión para saber solamente que tanta presión ejerce el biogás contenido en el volumen del tanque cuando esté completamente lleno.

La presión de regulación en el quemador ($P_{quemador}$) puede estar en el rango 8 – 25 mbar o de 8 – 13 cm de columna de agua según (VARNERO M, 2011). Para este caso se utiliza una presión de regulación de 25 mbar.

$$P_{quemador} = 25 \text{ mbar}$$

Podemos encontrar la velocidad de conducción del biogás en base a la demanda del quemador y el diámetro de tubería seleccionada (1/2" de diámetro).

Como ya se había visto anteriormente, la demanda en volumen por hora del quemador seleccionado es de $0.225 \text{ m}^3 \text{ de biogas/hr}$. Teniendo estos datos podemos calcular la velocidad de conducción del biogás con la siguiente formula (GILES, 1994).

$$v_{tuberia} = \frac{\dot{V}}{A_t} \quad (15)$$

Por último, necesitamos conocer el área transversal de la tubería, y se calcula de la siguiente manera:

$$A_t = \frac{\pi D^2}{4} \quad (16)$$

$$A_t = \frac{\pi(0.01 \text{ m})^2}{4} = 0.0000785 \text{ m}^2$$

Utilizando la formula (14), la velocidad de conducción del biogás dentro de la tubería es de:

$$v_{tuberia} = \frac{\left(0.225 \frac{\text{m}^2}{\text{hr}}\right) \left(\frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}}\right)}{0.0000785 \text{ m}^2} = 0.796 \text{ m/s}$$

Teniendo ya todos los valores podemos sustituirlos en la ecuación (9). De esta forma podemos calcular la presión del peso y después su peso en kilogramos.

Antes de sustituir valores eliminamos términos semejantes y términos que no aplican en este caso:

$$P_{atm} + P_{peso} + P_{biogas} + \rho g h_{tanque} + \frac{1}{2} \rho v_{tanque}^2 = P_{atm} + P_{quemador} + \rho g h + \frac{1}{2} \rho v_{tuberia}^2$$

La ecuación simplificada y despejada nos queda:

$$P_{peso} = P_{quemador} + \frac{1}{2} \rho v_{tuberia}^2 - \rho g h_{tanque} - P_{biogas} \quad (17)$$

$$P_{peso} = 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} + \frac{1}{2} \left(1.0864 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(0.796 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 - \left(1.0864 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (1.34 \text{ m}) - 2732 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

Convirtiendo a milibar:

$$P_{peso} = 25 \text{ mbar} + 0.004323 \text{ mbar} - 0.14 \text{ mbar} - 27 \text{ mbar}$$

$$P_{peso} = -2.13 \text{ mbar}$$

El resultado que se tiene es negativo porque la dirección de la presión es hacia adentro del sistema, ya que el objeto estará empujando y sacando gas del sistema para lograr la velocidad de conducción mencionada en la fórmula (15), esta presión es de 2.13 mbar equivalente a 213.56 Pa.

La fuerza que debemos tener para lograr esa presión en la superficie de área transversal del tanque viene dada por la siguiente relación (SERWAY, 1992):

$$P_{\text{peso}} = F/A_t \quad \rightarrow \quad F = A_{\text{tanque}} \cdot P_{\text{peso}}$$

Dónde: (18)

$F = \text{fuerza aplicada}$

$A_t = \text{Area transversal del tanque}$

Encontramos el área transversal del tanque con la fórmula (16):

$$A_{\text{tanque}} = \frac{\pi(0.8 \text{ m})^2}{4} = 0.5026 \text{ m}^2$$

Encontramos la fuerza con la fórmula (18)

$$F = (0.5026 \text{ m}^2) \left(213.56 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \right) = 107.3352 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$$

Teniendo la fuerza podemos encontrar la masa del objeto con la siguiente fórmula (SERWAY, 1992):

$$F = m \cdot g \quad \rightarrow \quad m = \frac{F}{g} \tag{19}$$

$$m = \frac{107.3352 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 10.9414 \text{ kg}$$

Teóricamente, tenemos que necesitamos 10.9414 kg distribuidos uniformemente sobre el área transversal superior del tanque, para que el biogás sea conducido a 0.796 m/s por la tubería de PVC de ½” de diámetro y cumpla con la demanda de biogás del quemador. Pero, por lo general en este tipo de sistemas la presión se le da empíricamente hasta observar que el biogás en combustión tenga una flama de color azul.

En cuanto al material del objeto, puede ser de caucho, madera o acero siempre y cuando esté protegido para no dañar el tanque plástico.

6.2.7 Producción de biofertilizante

Para el siguiente cálculo se consideraron los 20% de sólidos totales que contiene el estiércol bovino que se utiliza en el biodigestor para producir biogás, en base a esto y a la materia de carga diaria se determina la cantidad de biofertilizante que saldrá del biodigestor por medio de una suposición que nos dice que la carga diaria menos la cantidad de carga diaria multiplicada por el porcentaje de sólidos totales que teóricamente es la cantidad de materia que se transforma en biogás, podemos encontrar que tanto sustrato degradado obtendremos a la salida del biodigestor.

$$\mathbf{Biofertilizante\ líquido} = CD - CD * (ST) \quad (20)$$

$$\mathbf{Biofertilizante\ líquido} = 43.32\ L - 43.32\ L(0.20) = 34.656\ L$$

Los elementos con mayor cantidad de nutrientes benéficos para fertilizar el suelo son el Nitrógeno, Fósforo y Potasio. El porcentaje aproximado de nutrientes contenidos en el estiércol fresco biodigerido se presentó en la Tabla 4, y en base a estos porcentajes se puede tener una aproximación de la cantidad de nutrientes que contendrá este biofertilizante producido por el biodigestor.

$$\mathbf{Nitrogeno}_{0.8\%} = (0.008) \left(26 \frac{kg}{dia} \right) = 0.208\ kg/dia$$

$$\mathbf{Fosforo}_{0.04\%} = (0.0004) \left(26 \frac{kg}{dia} \right) = 0.00104\ kg/dia$$

$$\mathbf{Potasio}_{0.26\%} = (0.0026) \left(26 \frac{kg}{dia} \right) = 0.0676\ kg/dia$$

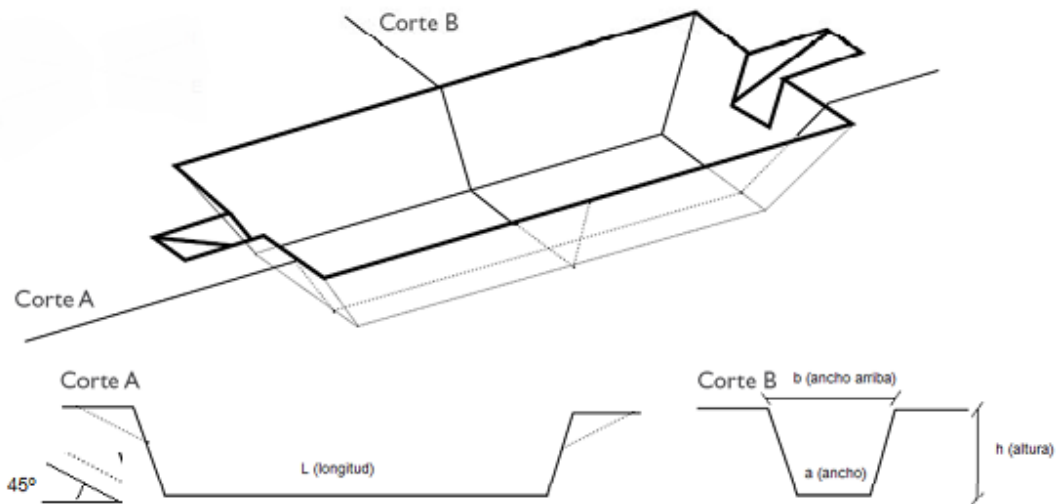


Ilustración 25. Cortes de zanja para biodigestor

6.3 Construcción: Materiales y Costos

La idea principal de un Biodigestor es que sea totalmente sustentable, económico, durable y que sea benéfico para el medio ambiente. Además de que resista las condiciones climáticas a las que se expone y buscar que la forma de operación sea lo más practico posible.

Antes de empezar a construir un biodigestor se tiene que preparar el terreno e identificar las tendencias climatológicas del lugar en donde se construye, ya que si es un lugar con fuertes vientos o zona sísmica puede llegar a dañar el biodigestor y ocasionar accidentes. Es por esto que se debe pensar en estos factores al construir el biodigestor para que resista estos cambios climatológicos inoportunos, utilizando materiales adecuados.

Al construir un biodigestor siempre se debe tener en mente la seguridad del sistema y tomar medidas de prevención de accidentes tanto en la construcción como en la operación.

A continuación se explica a detalle la forma en que se construye un biodigestor de polietileno tubular con sus materiales y costos.

6.3.1 Cámara de digestión

El biodigestor tipo bolsa será construido con polietileno tubular de una sola pieza, esto quiere decir que no estará compuesto de segmentos de tubo, sino de un solo segmento. La bolsa de polietileno utilizada tiene 0.8 m de diámetro y cuenta con un grosor de 300 μm , esto para que sea lo más hermético posible y evitar fugas del biogás o entradas de aire.

La zanja donde se colocará el biodigestor tiene que tener paredes inclinadas en forma de “V”, lisas y con chaflán para que no se dañe el polietileno. En los extremos tendrá dos cortes en 45° para la carga y descarga del material ([Ilustración 25](#)). La posición del orificio de la tubería de entrada debe estar situada en una altitud mayor a la tubería de salida, asegurando así que al momento de que se le agregue más carga de materia orgánica al biodigestor se irá desbordando por el otro extremo.

Las medidas que tendrá la zanja se indican en la [Tabla 20](#). Estas medidas dependen de las dimensiones del polietileno tubular antes mencionado.

Tabla 20. Dimensiones de la zanja

Acotación	Medida
b (Ancho de arriba)	0.80 m
a (Ancho de abajo)	0.40 m
h (Altura)	0.70 m
L (Longitud)	5 m

Una vez instalado el biodigestor en la zanja, es necesario protegerlo mediante una carpa o estructura de protección. En este caso el lugar presenta fuertes vientos la mayoría del tiempo y radiación solar.

Para darle solución a estos problemas que ocasionan las condiciones climáticas, el biodigestor tendrá una estructura de acero tubular de ½” para que soporte la fuerza del viento (**Ilustración 26**) y una cubierta de una lona multiuso con protección ultravioleta.



Ilustración 26. Estructura de protección de biodigestor de polietileno (Fotografía del proyecto en construcción).

6.3.2 Tubería de conducción y almacenamiento

El material con el que estará construida la tubería de conducción del biogás será de PVC SCH 40 de ½”. La ventaja de usar este tipo de tuberías consiste en que el material no se corroe y aguanta la presión del sistema, además de ser un material no tan costoso. Entre las desventajas están el desgaste causado por la radiación solar y la fragilidad ante movimientos bruscos, pero para evitar estas desventajas, para la radiación solar se protegerá la tubería con algún tipo de aislante como cinta adhesiva reflejante o pintura amarilla con protección ultravioleta; también, se fijará la tubería de una forma segura con sus respectivos señalamientos de precaución.

La tubería de conducción tendrá estos componentes en el siguiente orden:

- Flange de PVC de ½” para conexión de tubería al biodigestor
- Codo 45° PVC
- Válvula bola de bronce con teflón de ½” para la salida inmediata del biodigestor: Esta válvula es para cerrar el paso de biogás desde el biodigestor hacia la tubería de conducción
- TEE de PVC de ½” : Se usara una TEE para sacar un tubo hacia la válvula de alivio
- Válvula de alivio, recipiente con tubería sumergida en agua
- Un cople roscado PVC de ½” con tornillo de para drenaje de humedad
- Desulfurizador: Fabricado con tubería PVC de ¾” con rebabas de acero en el interior
- Codo 45° PVC
- Tee de PVC de ½”
- Válvula bola de bronce con teflón de ½” para reservorio
- Flange de PVC de ½” para conexión de tubería a reservorio
- Flange de PVC de ½” para conexión de tubería salida de reservorio
- Manómetro de columna de agua
- Válvula bola de bronce con teflón de ½” para quemador

Para el tanque de almacenamiento se utilizara el mismo material del biodigestor (polietileno tubular de 300 µm), posicionado verticalmente con un peso encima para darle suficiente presión al gas para alimentar al quemador. También tendrá una estructura de protección de acero tubular.

El plano de vista en planta que se muestra a continuación es diseño y elaboración propia, y muestra la ubicación de los componentes que tiene el biodigestor ([Ilustración 27](#)).

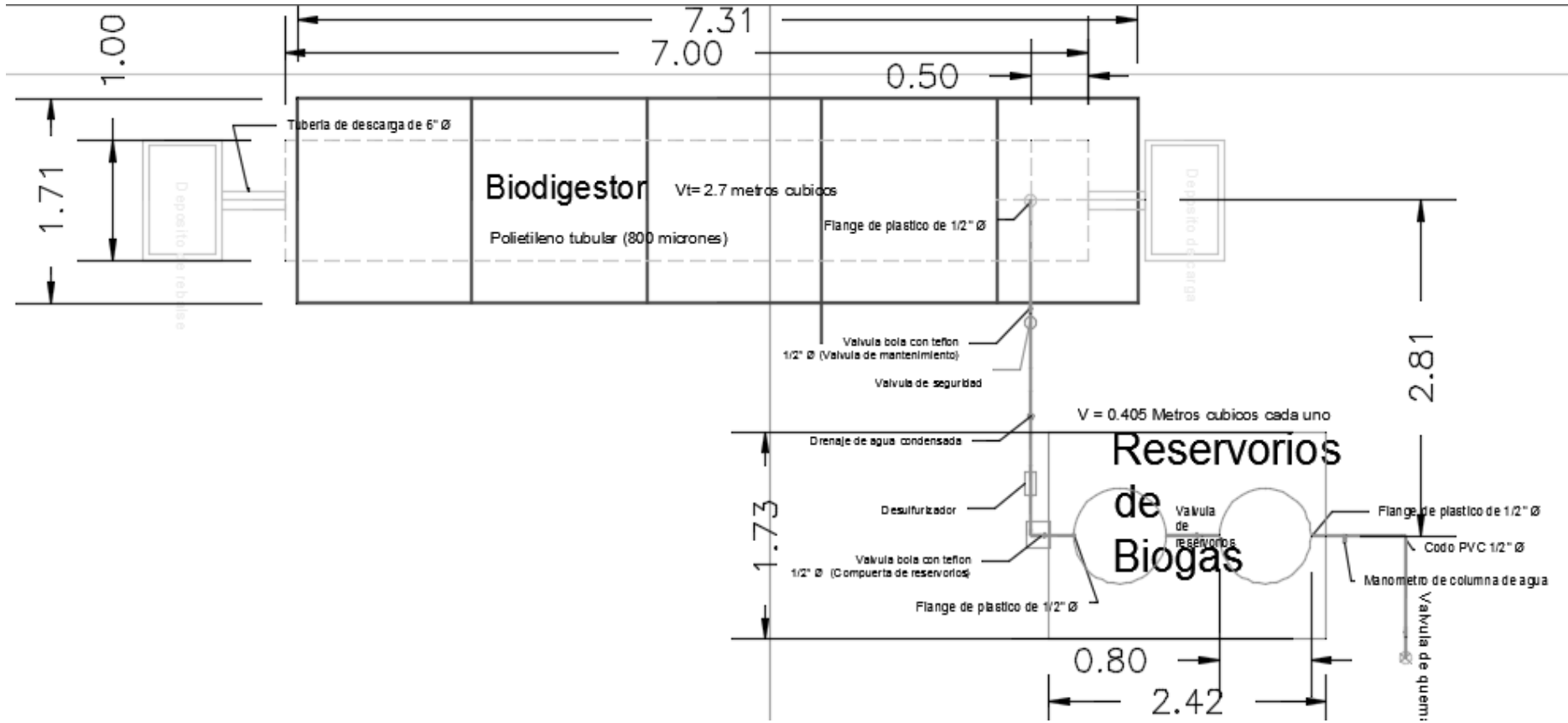


Ilustración 27. Dibujo ejemplo de vista en planta del sistema biodigestor y sus componentes.

6.3.3 Análisis económico

Los costos de un biodigestor varían de acuerdo a cada tipo de biodigestor y de la tecnología que se utilice en él, pero siempre tomando en cuenta que debe traer beneficios a mediano o largo plazo; es decir, beneficios tanto económicos como ambientales.

Como se aprecia en la **Tabla 21; Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el costo para el biodigestor con este método de construcción, suele ser mucho más barato de lo que se piensa, haciendo aún más factible y conveniente el uso de esta tecnología. Por otro lado, los materiales son más durables porque no se corroen ya que son plásticos, pudiendo llegar a tener 10 años de vida útil (HERRERO, 2008).

Para realizar una evaluación económica del biodigestor y del biogás producido se toma un equivalente en valor energético de un combustible fósil, en este caso del Gas LP.

Como ya se había visto en la sección 6.2.1 el equivalente energético del biogás es de $1 m^3 = 0.45 kg \text{ de Gas LP}$, esta relación puede variar dependiendo de la composición del gas.

Se determina el biogás producido anual:

$$\frac{\text{Biogás producido}}{\text{año}} = \left(0.9 \frac{m^3}{\text{dia}}\right) \left(\frac{1 \text{ año}}{360 \text{ dias}}\right) = 324 m^3/\text{año}$$

Tenemos que se producirán $324 m^3$ de biogás anualmente con este biodigestor experimental, que a su vez equivale a:

$$\frac{\text{Gas LP}}{\text{año}} = \left(324 m^3 \frac{\text{biogas}}{\text{año}}\right) (0.45 kg \text{ Gas LP}) = 145.8 kg \text{ Gas } \frac{LP}{\text{año}}$$

De acuerdo a los costos del Gas L.P. de una compañía local para el mes de Enero del 2015, el costo por 10 kg es de \$139.80 MN (SILZA, 2015), con este dato se puede obtener el costo del biogás producido anualmente en el biodigestor de la siguiente manera:

$$\text{Ahorro } (\$) = \left(\frac{145.8 kg \text{ Gas LP}}{10 kg \text{ Gas LP}}\right) (\$139.80) = \$ 2,038.28 MN/\text{año}$$

Tabla 21. Costos de materiales del biodigestor.

Materiales	Cantidad	Precio Unitario	Total (Pesos M.N)
Reactor Anaeróbico			
Polietileno tubular de 800 micrones (reactor)	1	\$ 500.00	\$ 500.00
Tubería de carga PVC 6"	1	\$25.00	\$25.00
Tubería de descarga PVC 6"	1	\$25.00	\$25.00
Cadena de plástico con aditamentos (agitador)	1	\$ 150.00	\$ 150.00
Estructura de acero para protección	1	\$ 500.00	\$ 500.00
Lona de protección	1	\$300.00	\$300.00
Tubería para conducción de biogás			
Codo de PVC de ½"	2	\$ 8.00	\$16.00
T-Fitting de PVC de ½"	2	\$ 13.00	\$ 26.00
Válvulas tipo bola de ½" con teflón	3	\$ 200.00	\$ 600.00
Cople universal roscado de PVC de ½" con tornillo	2	\$20.00	\$ 40.00
Flange adaptador de PVC de ½"	3	\$ 280.00	\$ 840.00
Válvula de seguridad (recipiente con agua)	1	Material reciclado	
Teflón	2	\$ 3.00	\$ 6.00
Filtro de H ₂ S (Esponja de acero)	1	\$ 50.00	\$ 50.00
Tanque para almacenamiento de biogas			
Polietileno tubular 800 micrones (Tanque)	1	\$ 200.00	\$ 200.00
Peso para aumentar presión en tanque	1	Material reciclado	
Estructura de acero para protección de tanque	2 tramos	\$ 150.00	\$ 300.00
Tubería PVC de ½"	3 m (c/u)	\$ 23.90	\$ 71.70
Mano de obra			
Mano de obra (Segun IMSS, 2013): Obra Civil	0-30 m		\$ 915.00
Costo de instalación			\$ 1,200.00
Otros materiales (10% del costo total)			\$ 576.47

		TOTAL	\$ 6,341.17
--	--	--------------	-------------

El costo total de inversión del biodigestor según la tabla de costos (

Tabla 21), es de \$ 6,341.17 M.N., entonces en base al costo del biogás anual se determina en cuanto tiempo se recuperaría la inversión:

$$\textit{T tiempo de recuperacion} = \frac{\textit{Inversión}}{\textit{Ahorro anual}} \quad (21)$$

$$\textit{T tiempo de recuperacion} = \frac{\$ 6,341.17 \textit{ MN}}{\$ 2,038.28 \textit{ MN/año}} = 3.111 \textit{ años} = \mathbf{3 \textit{ años y 3 \textit{ meses}}}$$

El tiempo de recuperación se puede considerar de mediano plazo, debido a que el costo inicial es muy bajo, pero esto no debería considerarse una limitación, ya que este tipo de biodigestores puede durar hasta 10 años, dado que se estaría sustituyendo el uso de Gas L.P. en ese periodo de tiempo y a su vez disponer correctamente de los residuos sólidos del estiércol en los establos.

Resulta conveniente al momento de tratar desechos en el sitio donde se construye ya que soluciona una problemática ambiental y de salud. Además, que siempre se dispondrá de biogás para las necesidades energéticas térmicas de la vivienda o establecimiento, ya que se está produciendo diariamente.

Lo que buscamos con este tipo de tecnologías y en todo su proceso desde la carga de estiércol hasta la producción del biogás, es que cualquier interacción de elementos con el medio ambiente se encuentre en un ciclo de sustentabilidad y de aprovechamiento.

El enfoque mental en el ser humano acerca de la sustentabilidad con el medio ambiente debe estar presente en las futuras generaciones, solo de esta forma podremos subsistir en nuestro planeta “Tierra”.

7 Conclusiones.

Los biodigestores anaeróbicos para el aprovechamiento de los desechos no es algo nuevo, sin embargo, actualmente en nuestro país es escasa su promoción. El uso de estiércol bovino para la producción de biogás mediante la tecnología de biodigestores, es una fuente de energía renovable, que puede contribuir a una mejora en las condiciones sanitarias de la población, al ofrecer una tecnología para el aprovechamiento del estiércol *in situ* y bajo condiciones controladas, además de obtener un energético de valor considerable.

La metodología desarrollada se puede adaptar para satisfacer mayores demandas de biogás o en casos donde se tiene mayor cantidad de residuos a degradar. Lo único que varía es el estudio económico, ya que depende del tipo de biodigestor que se utilizará para llevar a cabo la digestión anaeróbica, entonces se realizan otros cálculos de volumen, propios del diseño del sistema que se va a construir. En el sistema biodigestor prototipo pretende satisfacer un tanque pequeño de 10 kg de Gas L.P de consumo mensual y sobredimensionado un 20% para asegurar ese objetivo.

El gas metano que se obtiene en el proceso de fermentación es similar al gas natural y es considerado de buen aporte energético con un poder calorífico que podría ser de gran utilidad para satisfacer requerimientos de energía a nivel doméstico, industrial y de generación de electricidad.

El sistema biodigestor prototipo que se diseñó y dimensionó en este trabajo, convierte 9.360 Ton. de estiércol de bovino fresco al año y produce 324 m³ de biogás/año, que en comparación con el estiércol generado en la región solo se estaría utilizando el 0.00133% del total de estiércol generado anual, con una producción de un biocombustible que puede proporcionar una energía térmica de combustión de 2268 kWh/año. Se puede concluir que si se procesara todo el estiércol generado por la industria lechera de la región obtendríamos aproximadamente 169,269.732 MWh de energía calorífica de combustión al año.

De acuerdo a los resultados del análisis económico realizado para el prototipo desarrollado, el tiempo de recuperación de la inversión en relación a su costo, se considera que es relativamente corto, el cual fue de 3 años y 3 meses ahorrándonos \$2,038.28 pesos al año, que aunque el ahorro

no es tan considerable, nos da una visión de lo que sería implementar esta tecnología a grandes escalas para producir electricidad.

La tecnología estudiada en este trabajo, es una alternativa de solución al aprovechamiento, manejo y disposición final de residuos orgánicos, ya que se estima que se generan grandes cantidades de estiércol y desechos orgánicos contenidos en los residuos sólidos urbanos a nivel nacional y en la región, para los cuales la infraestructura existente es insuficiente. Adicionalmente, la obtención de biogás a través del sistema biodigestor prototipo, tiene beneficios ambientales al incorporar 26 kg/día estiércol y dejar un residuo con mínimas emisiones de gases a la atmósfera, y donde el subproducto obtenido de este sistema son 46.8 L/día de fertilizante para emplearse en la conservación de suelos.

Considero necesario, promover la difusión técnica de la digestión anaeróbica, para que sea conocida y comprendida por toda la población, en especial en el área rural, industrial y urbana. Es importante, porque así se puede concientizar y aplicar una cultura en el manejo apropiado de los desechos orgánicos, como por ejemplo separar los residuos sólidos urbanos, organizarse y crear centros de acopio para su posterior tratamiento mediante plantas de biogás, etc.

Por último, sugiero que las instituciones de educación superior y de investigación en nuestro país, fomenten líneas de investigación referente al diseño y construcción de biodigestores anaeróbicos, para el tratamiento de efluentes y desechos orgánicos provenientes de los residuos sólidos urbanos y residuos de manejo especial, como el estiércol.

1. ANEXO: Quemador de biogás



RUPAK ENTERPRISES
www.rupakbiogas.com



Product Specification

We offer an exclusive range of Mini- Handle Single Burner, which are extensively used in the households and other places in the domestic as well as in the international market. Our Mini- Handle Single Burner are manufactured from finest quality raw materials so as to provide them with strength and durability.

Item Name	Standard	Model	Body Finish	Burners	Pan Stands	Rating	Dimensions	Weight
Single Burner	ISI	Lilyput	Stainless Steel	Cast Iron	Cast Iron	225 l/h	235X270X55	2 kg
Single Burner	KVIC	Lilyput	Stainless Steel	Cast Iron	Cast Iron	225 l/h	235X255X55	1.6 kg
Single Burner	KVIC	Mini	M.S.P.C	Al/Brass	M.S. Painted	225 l/h	270X310X65	1.5 kg
Single Burner	KVIC	Cast Iron	Painted	Cast Iron	Cast Iron	225 l/h	260X280X90	5 kg
Double Burner	ISI	Camp	Stainless Steel	Cast Iron	Cast Iron	675 l/h	475X270X45	3 kg
Double Burner	KVIC	Camp	Stainless Steel	Cast Iron	Cast Iron	675 l/h	475X255X45	3 kg
Double Burner	ISI	Lilyput	Stainless Steel	Cast Iron	Cast Iron	900 l/h	525X300X55	4 kg
Double Burner	KVIC	Lilyput	Stainless Steel	Cast Iron	Cast Iron	900 l/h	525X280X55	4 kg
Double Burner	ISI	Lilyfly	Stainless Steel	Cast Iron	Cast Iron	900 l/h	530X280X85	4.5 kg
Double Burner	KVIC	Lilyfly	Stainless Steel	Cast Iron	Cast Iron	900 l/h	530X265X85	4.5 kg

<http://www.rupakbiogas.com/biogas-mini-handle-single-burner--465637.html>

8 Referencias

1. ALTERCEXA. (2010). Informe complementario sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogas en extremadura, en el marco del proyecto de cooperacion transfronteriza España-Portugal. España - Portugal: ALTERCEXA, para el apoyo al cambio climatico a traves del fomento de las energias renovables en extremadura, alentejo y centro.
2. ANAYA, D. C., GINER, M. E., VALLES, M. V., ROE, S. M., MALDONADO, J. A., LINDQUIST, H., . . . SCHREIBER, J. (Junio de 2010). Emisiones de gases de efecto invernadero en Baja California y proyecciones de casos de referencia 1990 - 2025. Baja California: Comision de Cooperacion Ecologica Fronteriza (COCEF).
3. BIOGEMEX. (2015). Obtenido de <http://www.biogemex.net/noticias/testimonios/>
4. BIOGEMEX. (2015). Obtenido de <http://www.biogemex.net/>
5. CARMONA, M. E. (2008). Estudio tecnico-economico de la digestion anaerobica conjunta de la fraccion organica de los residuos solidos urbanos y lodos de depuradora para la obtencion de biogas. Departamento de ingenieria civil: Ordenacion del territorio, urbanismo y medio ambiente.
6. CASTILLO, U. R. (2009). Diseño de un biodigestor para una finca del recinto San luis de las Mercedes del Canton Las Naves. Guayaquil, Provincia de bolivar, Ecuador: Escuela Superior Politecnica del Litoral. Facultad de Ingenieria en Mecanica y Ciencias de la Produccion.
7. CEE. (2013). *Comision Estatal de Energia de Baja California*. Obtenido de BLP- Autoabastecimiento de energia electrica por medio de un biodigestor: <http://energiabc.gob.mx/index.php/que-hacemos/aprovechamiento-de-los-recursos/2-uncategorised/22-blp-autoabastecimiento-de-energia>
8. CENGEL, Y. A., & BOLES, M. A. (1996). *Termodinamica*. McGraw Hill 2da Edicion.
9. CERTIC Energia, A. E. (2015). Obtenido de www.groupecertic.com
10. CHACON, J. A. (2006). *Tecnologia del biogas: Manual de usuario*. Ciudad de la Habana, Cuba: Editorial Cubasolar.
11. COMEGEI. (2010). *Comite Mexicano para Proyectos de Reduccion de Emisiones y Captura de Gases de Efecto Invernadero*. Obtenido de Cambio Climatico en Mexico: <http://cambioclimatico.inecc.gob.mx/sectprivcc/comegei.html>

12. DE LA CRUZ, Q. M. (2009). Diseño de un sistema hibrido de utilizacion de gas propano y metano domiciliario. San Carlos, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingenieria. Escuela de Ingenieria Mecanica Electrica.
13. DE LA GUERRA, C. A. (2011). Generacion distribuida a partir de biogas producido en granjas porcinas. Ciudad Universitaria, Distrito Federal, Mexico: Universidad Autonoma de Mexico, Facultad de Ingeieria, Instituto de Ingenieria.
14. DEUBLEIN, D., & STEINHAUSER, A. (2008). *Biogas from Waste and Renewable Resources: An introduction*. Federal Republic of Germany, Alemania: WILEY-VCH.
15. FELDER, & ROUSSEAU. (2004). *Principios Elementales de los Procesos Químicos*. Limusa Wiley, 3ra Edicion.
16. FUNK, T. (2007). Anaerobic methane digesters for dairy farms: Ar you asking the right questions. *University of Illinois*.
17. GILES, R. V. (1994). *Mecánica de fluidos e hidráulica*. Ed. McGraw Hill.
18. GUEVARA V, A. (1996). Fundamentos basicos para el diseño de biodigestores anaerobicos rurales. Lima, Peru: Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria y Ciencias del ambiente.
19. HERRERO, J. M. (2008). Biodigestores familiares: Guia de diseño y manual de instalacion. *Biodigestores de polietileno tubular de bajo costo para tropico, valle y altiplano*. La Paz, Sucre, Bolivia: GTZ-Energia.
20. HILBERT, J. A. (2003). Manual para la produccion de biogas. Buenos Aires, Argentina: Instituto de Ingenieria Rural, I.N.T.A, Castelar.
21. HOJNACKI, A., LI, L., KIM, N., MARKGRAF, C., & PIERSON, D. (2011). *Biodigester Global Case Studies*. Estados Unidos - India: D-Lab Waste.
22. INDURA. (Septiembre de 2006). Manual de Gases. Santiago de chile, Chile: INDURA S.A, Industria y comercio. Obtenido de Air Liquide: <http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp?languageid=9&GasID=26&CountryID=19>
23. KOSSMANN, W., & HABERMEHL, S. (1999). Biogas Digest, Volume III: Biogas - Costs and Benefits and biogas - Programme Impementation. Germany: Information and Advisory Service on Appropriate Technology (ISAT) - Deutsche Gessellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), GmbH.
24. LEON, F. M., BARRANTES, J. G., & CANDIA, J. R. (2012). Aprovechamiento del estiércol de gallina para la elaboracion de biol en biodigestores tipo batch como propuesta al manejo de residuo avicola. Puno, Peru: XIX Simposio Peruano de Energia Solar y del Ambiente.

25. LÜER, M. (2010). Instalation manual for Low-Cost Polyethylene Tube Digesters. Germany: GTZ.
26. MEARS, E. T., & ANDERSON, R. H. (April de 2011). Biogas plant construction manual. Kabul, Afghanistan: United States Forces - Afghanistan, Joint Engineer Directorate.
27. MEDINA, L. (1984). Evaluacion Tecnico-economica del uso de estanques prefabricados de asbesto-cemento; modificados para producir biogas. Maracay. Tesis de grado. Facultad de Agronomia. U.C.V. 65 p.
28. MENDEZ, N. E., CHAN, G. E., CASTILLO, B. E., VAZQUEZ, B. E., & ESPADAS, S. A. (2012). Digestion anaerobia de efluentes de fosas septicas. *Ingenieria, Investigacion y Tecnologia, volumen XIII (Numero 3)*.
29. MONCAYO, R. G. (2011). *Biodigestores: Manual practico de diseño*. Aqualimpia consultores.
30. OLAYA, A. Y., & GONZALEZ, S. L. (Julio de 2009). Fundamentos para el diseño de biodigestores. Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Facultad de Ingenieria y Administracion.
31. OLAYA, L. (2006). Diseño de un biodigestor de cúpula fija. *Trabajo de Grado (Ingeniero Agricola)*. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira.
32. OLAYA, Y., & GONZALEZ, L. O. (2009). Fundamentos para el diseño de biodigestores. Palmira, Valle del Cauca, Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Facultad de Ingenieria y Administracion.
33. PAREDES, R. R., & BACA, L. M. (2005). *Generacion de energia con biogas de residuos agricolas en plantas agroindustriales, La libertad - Perú*. Cartagena de la India, Colombia: Third LACCEI International and Caribbean for Engineering and Technology: Advances in Engineering and Technology: A global perspective.
34. PEREZ, M. J. (2010). lecheros, Estudio y diseño de un biodigestor para aplicacion en pequeños ganaderos y. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Fisicas y Matematicas. Departamento de Ingenieria Mecanica.
35. PIZARRO C., W. M. (2006). An economic assessment of algal turf scrubber technology for treatment of dairy manure effluent. *Journal of Ecological Engineering. ElSevier*.
36. S.G PAVLOSTATHIS, E. G. (1991). Kinetics of Anaerobic Treatment: A critical Review. *Critical Reviews in Environmental Control*.
37. SASSE, L. (1988). Biogas Plants. *A publication of the Deutsches Zentrum fur Entwicklungstechnologien*. Germany: GTZ GmbH.
38. SEISA. (2015). Obtenido de <http://www.seisa.com.mx/energia.html>

39. SEMARNAT. (2013). *Indicadores Basicos del Desempeño Ambiental de Mexico*.
Obtenido de
http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores14_cd/conjuntob/04_res_solidos/04_introduccion.html
40. SERWAY. (1992). *Fisica*. Ed. McGraw Hill.
41. SILZA, G. (2015). *GAS SILZA*. Obtenido de <http://www.gassilza.com/gaslp.htm>
42. SPD, B. (2011). Planta de producción de biogas de Cati. *RETEMA*, 69.
43. TAMAYO, S. J. (2009). Diseño, Construcción y puesta en marcha de un biodigestor a escala piloto para la generación de biogas y fertilizante orgánico. *Tesis de grado presentada para la obtención de ingeniero químico*. Quito, Ecuador: Universidad de San Francisco de Quito.
44. TAYLHARDAT, L. (1986). El Biogas, Fundamentos e infraestructura rural. . *Maracay. Instituto de Ingeniería Agrícola. Facultad de Agronomía.*, 68 p.
45. VARNERO M, M. T. (2011). Manual de Biogas. 14 p. Santiago de Chile, Chile: GEF, MINENERGIA, PNUD, FAO.
46. VARNERO, M., & ARELLANO, J. (1990). Aprovechamiento racional de desechos orgánicos. *Informe Técnico*. Santiago, Chile: Ministerio de agricultura. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.
47. VERJEL, W. A., & PEÑARETE, A. B. (2010). Estudio de factibilidad técnica y financiera del uso del biogas obtenido del excremento de ganado para suplir necesidades energéticas en el sector rural. Bucaramanga, Santander, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Matemáticas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.
48. WEISS, W. P., & NORMAND, S.-P. (2009). Estrategias de alimentación para disminuir la producción de estiércol de vacas lecheras. *Northeast Regional Meeting of the National Mastitis Council* (pág. 5). Wooster: Ohio Agricultural Research And Development Center. Department of Animal Sciences.
49. WELLINGER, A. (11 de 1 de 1999). Process Design of agricultural digesters. Ettenhausen, Frauenfeld, Suiza: Nova Energie GmbH.
50. WIKIPEDIA. (2015). Obtenido de http://en.wikipedia.org/wiki/Silica_gel
51. ZINDER, S. (1998). Techniques in Microbial Ecology. *Oxford University Press, New York*, 113-135.