Manual práctico de biodigestores

Enfocado para Latinoamérica (escala pequeña y mediana escala)

Teoría, práctica y ejercicios

En el marco del Proyecto

“Apoyo al Programa Nacional de Cambio Climático en Costa Rica.

Mejora de la capacidad de mitigación y adaptación de Costa Rica.”

ASO BIOGÁS

Cooperación Española

Manual práctico en biodigestores, Enfocado para Latinoamérica (pequeña y mediana escala). Teoría, practica y ejercicios.

Documento elaborado por encargo de:

Elaborado por:

Autor
Víquez Arias, Joaquín A.

Revisado por (orden alfabético):
Carolina Hernández Chanto

***ACLARACIÓN**: Esta publicación ha sido preparada en el marco del proyecto "Apoyo al Programa Nacional Cambio Climático Mejora de la Capacidad de Mitigación y Adaptación de Costa Rica" implementado por MINAE y MIDEPLAN y ejecutado en Costa Rica por el Instituto Costarricense de Electricidad. Sin perjuicio de ello, las conclusiones y opiniones de los autores no necesariamente reflejan la posición de las organizaciones involucradas. Además, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar en ningún caso constituye una recomendación por parte de las organizaciones involucradas.*

Contenido

1. Fundamento de la biodigestión 7
   1.1. ¿Qué es un biodigestor? Una aproximación 7
   1.2. Historia de los biodigestores 9
   1.3. Procesos bioquímicos (y fisicoquímicos) en el biodigestor 11
   1.4. Parámetros en un biodigestor 12
      1.4.1. Temperatura 12
      1.4.2. AGV, alcalinidad y pH 13
      1.4.3. Nutrientes, elementos traza e inhibición 14
2. Sustratos y sus características 15
   2.1. Impacto del sustrato en el biodigestor 15
   2.2. Parámetros y características de un sustrato 17
3. El biogás, su generación, acondicionamiento y uso 20
   3.1. Estimación de la cantidad de biogás 20
   3.2. Características de biogás 21
   3.3. Acondicionamiento y manejo del biogás 23
      3.3.1. Conducción del biogás 23
      3.3.2. Válvulas de seguridad (o presión) (o alivio) 25
      3.3.3. Filtrado 26
   3.1. Usos del biogás 29
      3.1.1. Uso térmico del biogás 32
      3.1.2. Uso mecánico del biogás 33
      3.1.3. Uso eléctrico del biogás 35
4. El digestato, sus características y aprovechamiento 36
   4.1. ¿Qué es el digestato? 36
5. Tipos de biodigestores 37
   5.1. Por flujo (continuo o discontinuo) 40
   5.2. Crecimiento suspendido o adherido (o hibrido) 40
6. Dimensionamiento de biodigestores 41
7. Referencias 44
8. Anexos 46

Índice imágenes

Imagen 1. Ejemplos de biodigestores; a y b) biodigestor flexible, c) biodigestor de mezcla completa, d y e) reactor anaeróbico de flujo ascendente, y f) laguna cubierta. 8

Imagen 2. La evolución de los biodigestores flexibles ("bolsa", "plástico", "estilo Taiwán", "salchicha") desde su creación en los 70's a la actualidad (2018). a) conceptualización del biodigestor de bolsa[1], b) un biodigestor tipo Taiwán realizado por Endev-Bolivia de la GIZ y CIPCA[2], biodigestor en geomembrana de PVC de la empresa Viogaz[3], y biodigestor en geomembrana de LDPE por la empresa Sistema biobolsa[4]. 10

Imagen 3. Grupos tróficos y vías metabólicas reconocidas actualmente. 11

Imagen 4. Ejemplo de diferentes sustratos utilizados para la digestión anaerobia. a) aguas rojas de un matadero, b) sueros lácteos, c) estiércol de ganado lechero, d) citropulpa del procesamiento del cítrico, e) agua residual de una granja de cerdos, f) residuos sólidos urbanos. 15

Imagen 5. Análisis cualitativo de las tecnologías apropiadas para el manejo de sustratos orgánicos. 17

Imagen 6. Ejemplo de un set experimental donde se realiza una prueba de rendimiento de metano siguiendo la metodología de (Standard, V. D. I., 2006). Universidad EARTH. 21

Imagen 7. Ilustración de un biodigestor, su conducción, seguridad, filtrado y uso final. Imagen del biodigestor ofrecido por la empresa Sistema Biobolsa. 23

Imagen 8. Ejemplo de instalaciones de biogás realizadas correctamente. a) corresponde a biogás conducido en poliducto (polietileno) en 1''Ø con un punto de desfogue. b) corresponde a un alinea de biogás en tubería en PVC en 2' Ø', con soportes permitiendo una correcta alineación. 24

Imagen 9. Válvulas de presión utilizadas comúnmente en biodigestores flexibles. a) tubería sumergida en botella de plástico con 10 cm de columna de agua (CA)*, b) válvula de alivio fabricada con PVC para uso comercial con 4 cm de CA por la empresa Viogaz, y c) válvula de alivio fabricada con PVC para uso comercial por la empresa Sistema BioBolsa. 26

Imagen 10. Daño evidente en los cabezotes de un motor, por la falta de filtración del biogás. 27

Imagen 11. Ejemplo de un filtro utilizando el concepto de adsorción utilizando sulfatreat, instalado en una granja porcina en Costa Rica por la empresa Viogaz. 28

Imagen 12. Análisis cualitativo de tecnologías a utilizar, según la cantidad de biogás a filtrar y la concentración de H2S. 28

Imagen 13. Formulas involucradas para el diseño de una estufa que utiliza biogás como combustible. 29

Imagen 14. a) Ejemplo de la diferencia de diámetro de inyección del combustible en un equipo de gas propano (GLP) y otro equipo similar a biogás, y b) labor de aumento del diámetro de inyección usando un taladro. 30

Imagen 15. Ilustración fotográfica, de los pasos para el cambio de un sistema de carburación de gasolina, por un sistema de carburación a gas, en un motor Briggs & Stratton de de 6,5 HP utilizado en un equipo de ordeño. 31

Imagen 16. Otros ejemplos de adaptaciones al motor para operar con biogás. a)[1] utilizando un flanger de admisión, b)[2] unidad de vacío desarrollada con impresión 3D, tomado como referencia (Von Mitzlaff, 1988), y c)[2] unidad de vacío experimental. 31

Imagen 17. Foto de una lampara operada con biogás. 32

Imagen 18. Foto de una estufa a biogás 32

Imagen 19. Foto de una criadora a biogás 32

Imagen 20. Foto de un calentador de agua a biogás. 33

Imagen 21. Foto de un calentador de agua a biogás. 33

Imagen 22. Ejemplo de diferentes aplicaciones operadas con un motor operado a biogás, acoplado a diferentes usos: a) picadora de pasto, b) sistema de ordeño, y c) molino de masa. 34

Imagen 23. Consumo de biogás según la potencia del motor. 34

Imagen 24. Eficiencia de un generador eléctrica según la escala del generador. 35

Imagen 25. Eficiencia de un generador eléctrica (y térmico) según la potencia en la que opera el equipo para un equipo de 55 kW. 35
Imagen 26. Ejemplo de aplicación de biogás con generadores eléctricos de varias escalas. a) generador marca GreenPower de 3,5 kW en Managua, b) generador marca Generac de 20 kW en San Carlos, Costa Rica, c) generador marca Generac de 60 kW en Guanacaste, Costa Rica y d) generador marca 2G de 200 kW en Cartago, Costa Rica. 36
Imagen 27. Ejemplo de la diferencia de producción de follaje gracias la uso del biol como biofertilizante. La Paz, Bolivia. 37
Imagen 28. Diagrama de clasificación de los diferentes conceptos de biodigestores. (a) significa que operan con sustratos líquidos, (b) sustratos líquidos con mayor contenido de sólidos, y (c) con sustratos sólidos. 39
Imagen 29. Fotografías de diferentes tipos de biodigestores. a) biodigestor mesofílico de mezcla completa de dos fases (Alemania), b) Biodigestor de contacto para aguas de la industria de la palma aceitera en Costa Rica, c) biodigestor UASB tratando aguas mieles de la industria del café en Costa Rica, d) biodigestor de laguna cubierta de 900 m3 en una granja de cerdos en Costa Rica, e) biodigestor domestico de domo fijo nicaragüense, en Nicaragua, f) icónico biodigestor flexible, popularmente conocido como bolsa con la adición de reservorios flotantes en la Universidad EARTH en Costa Rica. 41
Imagen 30. Secciones que considerar en el diseño de un biodigestor. 42

Índice de Tablas

Tabla 1. Listado de macro y micronutrientes para el tratamiento anaeróbico. 14
Tabla 2. Lista de sustratos típicos para la digestión anaerobia con sus características principales. 19
Tabla 3. Composición típica del biogás. 22
Tabla 4. Características del biogás asumiendo 58% CH_4 y 42% CO_2, saturado de agua a 30°C y 1 atm de presión. 22
Tabla 5. Tabla de equivalencias energéticas de 1 Nm^3 de biogás con 65% de metano con un poder calorífico de 22,4 MJ/m^3. 22
Tabla 6. Estimación de la perdida de presión en mbar por cada metro lineal de tubería, según el flujo y diámetro de la tubería. 25
Tabla 7. Rangos recomendaciones de filtración del biogás, según el uso final. 26
Tabla 8. Multiplicador de los orificios de inyección en gas natural y gas licuado de propano, según la calidad del biogás (concentración de metano). 30

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Estimación de la cantidad de metano en base a la composición molecular del sustrato. 20
Ecuación 2. Estimación de la cantidad de metano en base a la composición molecular del sustrato 20
Ecuación 3. Estimación de la cantidad de metano en base a la composición molecular del sustrato 21
Ecuación 4. Fórmulas para estimar la perdida de presión en una tubería que conduce biogás. 24
Ecuación 5. Combustión del biogás con aire. 29
Ecuación 6. Formula que explica la velocidad de carga orgánica. 37
Ecuación 7. Relación matemática del tiempo de retención hidráulico. 38
Ecuación 8. Fórmula para calcular carga orgánica (CO). 42
Ecuación 9. Fórmula para calcular el volumen del biodigestor basado en la VCO. 43
Ecuación 10. Fórmula para calcular el TRH del biodigestor basado en el volumen del biodigestor. 43
Ecuación 11. Fórmula para calcular el volumen del biodigestor basado en el TRH. 43

Índice de anexos

Anexo 1. Ejemplo de la estimación de lodo primario con composición molecular de $C_{10}H_{19}O_3N$ (Rittmann, 2012) a metano, según la fórmula de (Buswell, 1952). 46
Anexo 2. Ejemplo de cálculo de la estimación de la cantidad de biogás que puede generar una granja de 50 cerdos. 46
Anexo 3. Ejemplo de cálculo de la estimación de la cantidad de biogás con el método del DQO. 46
Anexo 4. Ejemplo del cálculo de la cantidad de material filtrante requerido para remoción del H2S en el biogás. 47
Anexo 5. Cálculo de la combustión de biogás en aire. Estimación de la cantidad de aire por volumen de biogás para lograr una combustión completa. 47
Anexo 6. Estimación del consumo de biogás de un generador eléctrico siguiendo algunos supuestos. 48
Anexo 7. Ejemplos de cálculos relacionados al tiempo de retención hidráulica. 48

Antecedentes

La Asociación Costarricense de Biogás (Asobiogás) desde sus inicios ha definido dentro de sus objetivos estratégicos la promoción y socialización de la tecnología en biodigestión para la generación de energía y su aprovechamiento eléctrico y/o térmico, como parte de una estrategia de desarrollo adaptado y bajo en emisiones. Es por ello que dentro del marco del proyecto "Apoyo al Programa Nacional de Cambio Climático en Costa Rica" se contrata los servicios profesionales de Asobiogás para elaborar un manual práctico que se pueda utilizar como guía para entender la tecnología, las medidas de seguridad mínimas y los diferentes usos energéticos que tiene esta fuente de energía.

1. Fundamento de la biodigestión

1.1. ¿Qué es un biodigestor? Una aproximación

El biodigestor es una impresionante tecnología con millones de unidades instaladas operando alrededor del mundo, con capacidad de transformar bioquímicamente materia orgánica en metano y un biofertilizante. Al hacer esto, un biodigestor es capaz de:

- Reducir el **impacto del cambio climático** al reducir las emisiones de efecto invernadero, capturando el metano que, en su defecto, pudiese ser generado por los residuos orgánicos tratados de forma incorrecta. El metano generado, al sustituir el uso de combustibles fósiles, reduce aún más emisiones y genera menor dependencia de los hidrocarburos.
- **Reducir, tratar y convertir** los residuos orgánicos en un recurso. Al tomar un residuo orgánico, procesarlo y convertirlo en metano y biofertilizante, este residuo es estabilizado bioquímicamente, o sea, es tratado y reducido.
- Promover el **reciclaje de nutrientes**, al convertir un residuo orgánico en un biofertilizante para la agricultura, pues el biodigestor no afecta el contenido nutritivo de la materia orgánica, más bien la convierte en sus versiones mineralizadas.
- Producir **energía limpia**, al ser el metano el principal subproducto gaseoso de la biodigestión, un gas inflamable, con alta flexibilidad para ser utilizado como energía térmica y mecánica.
- Finalmente, un biodigestor ofrece una opción tecnológica para **empoderar** desde pequeños agricultores hasta la sectores industriales, ofreciendo energía, tratamiento de desechos, control de malos olores, seguridad veterinaria, ingresos y ahorros económicos (Al Seadi, 2008).

Pero más allá, un biodigestor es simple y sencillamente, la biomimetización[1] de un proceso que ocurre naturalmente. La digestión anaerobia es la descomposición, (sin oxígeno atmosférico) de material orgánico, liderado por un consorcio amplio de microorganismos. Este proceso es tradicionalmente referido a que ocurre naturalmente en sedimentos de lagos y/humedales (donde fue descubierto), y el sistema digestivo de rumiantes, pero también se ha documentado en sistema digestivo nlde termitas, humanos, placa dental, y hasta en el duramen[2] de un árbol (Speece, 2008).

Por lo tanto, y en principio, un biodigestor (también referido como reactor biológico o digestor) es un recipiente cerrado donde se introduce materia orgánica, idealmente residuos, y el metano es producido y capturado. Está equipado de una entrada para alimentarlo y dos salidas para el biogás y el efluente (también conocido como digestato). Existen de todas formas y tamaños, varios ejemplos se pueden ver en la Imagen 1.

Imagen 1. Ejemplos de biodigestores; a y b) biodigestor flexible, c) biodigestor de mezcla completa, d y e) reactor anaeróbico de flujo ascendente, y f) laguna cubierta.

Fuente: (Viquez J. , 2009-2018)

[1] Biomimetización: Viene del concepto de mimetismo que, en biología, se refiere cuando un animal toma la apariencia de su entorno. En biodigestores, el biomimetismo, hace referencia a como el ser humano ha tomado "la apariencia" o ha aprovechado un proceso natural, y lo ha convertido en un proceso ingenieril y aprovechable.
[2] Xilema leñosa de un árbol.

1.2. Historia de los biodigestores

Ver la historia de los biodigestores es entender de donde vienen, por qué son adoptados y observar dónde ha habido éxito o fracaso. Se espera que esto sirva de inspiración para seguir desarrollando la tecnología y creando nuevos sistemas.

La idea del uso de un gas inflamable que proviene de la descomposición de materia orgánica es conocido anecdóticamente desde hace varios siglos en Asia. Tradicionalmente, se le atribuye a Alessandro Volta el descubrimiento del biogás, al observar y documentar burbujas que salían del fondo de sedimento del lago Maggiore en Italia. Sin embargo, varias fuentes concuerdan que el primer biodigestor fue construido en 1859 en Bombay, India (Fulford D. , 2015).

Desde la invención del primer tanque séptico (una forma de biodigestión) por el francés Mouras en 1859 (Fulford D. , 2015), le han seguido el desarrollo de primeros conceptos por A.M. Buswell en 1952 (Buswell, 1952), seguido del biodigestor Taiwán en 1970 por el inglés Thomas Preston (Davis, 1983), inventores e investigadores, cada quien en su época, que fueron contribuyendo al entendimiento de la fermentación anaerobia y aportaron al desarrollo de nuevos conceptos.

En Latinoamérica los biodigestores fueron promovidos en los años setenta y ochenta por variedad de programas de apoyo internacional, por ejemplo la Agencia de Cooperación Alemana GTZ, para analizar la viabilidad de la tecnología en la región. Como se menciona (Martí Herrero, 2016), hubo un enfoque técnico con altos subsidios, desestimando la importancia de la adopción social y con grandes fracasos en su uso a largo plazo. Inicialmente, estos programas arrancaron con biodigestores de domo fijo y domo flotante (ver más adelante los diferentes tipos de biodigestores), pero luego fue sustituido por el biodigestor de “bolsa” o “salchicha”, conocido como tipo Taiwán (por su lugar de origen (Davis, 1983)), introducido en Colombia rápidamente por su bajo costo (Martí Herrero J., 2017). Este modelo de biodigestor fue muy adoptado, siendo una de las tecnologías de mayor uso en la región, con posteriores modificaciones y mejoras por iniciativas privadas, como por ejemplo la empresa Sistema BioBolsa en México, Viogaz en Costa Rica y Cidelsa en Perú.

Imagen 2. La evolución de los biodigestores flexibles ("bolsa", "plástico", "estilo Taiwán", "salchicha") desde su creación en los 70's a la actualidad (2018). a) conceptualización del biodigestor de bolsa[1], b) un biodigestor tipo Taiwán realizado por Endev-Bolivia de la GIZ y CIPCA[2], biodigestor en geomembrana de PVC de la empresa Viogaz[3], y biodigestor en geomembrana de LDPE por la empresa Sistema biobolsa[4].

Fuente: [1] (Davis, 1983); [2] (Martí Herrero, 2016),[3] (Viquez J. , 2009-2018); [4] (Viquez J. , 2009-2018).

En el arranque de la primera década del siglo XXI (2000's), existe lo que pareciera un movimiento globalizado de conciencia colectiva para implementar biodigestores. Algunos ejemplos:

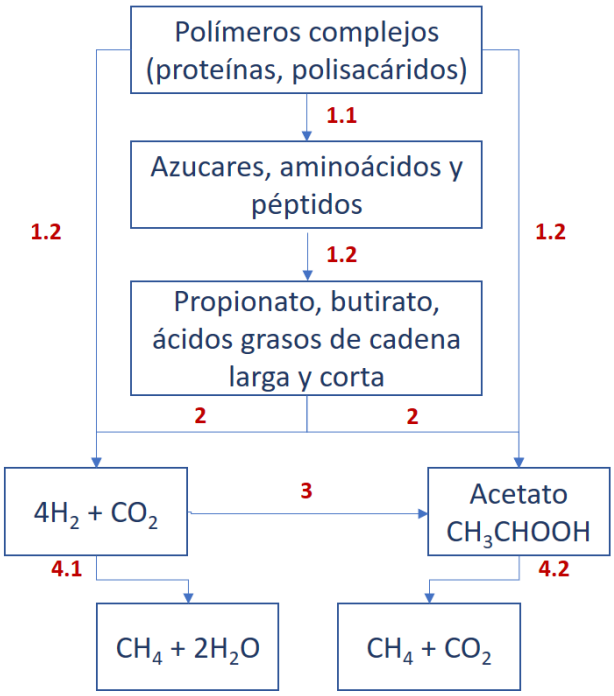
- En el 2002 el Instituto Costarricense de Electricidad en Costa Rica arranca con un Programa Biogás.
- El investigador Jaime Martí llega a Bolivia a implementar biodigestores en clima frío.
- 2009-2010 se fundó la Red de Biodigestores para Latino América y el Caribe.
- Mediados del 2010 arranca a operar la empresa Viogaz en Costa Rica (con un logro a la fecha de 13.800 m^3 de biodigestor).
- Se funda formalmente en el 2010 la Empresa Social Buen Manejo del Campo, que bajo la marca Sistema Biobolsa implementa biodigestores prefabricados (a la fecha llevan cerca de 4.000 unidades).
- En el 2012 arranca el Programa Nacional de Biogás de Nicaragua (replica de los programas nacionales de biogás en Asía - ver (Fulford D. , 2015) para más detalle), operado por la Cooperación Holandesa para el Desarrollo (SNV), seguido de iniciativas en Bolivia-Perú.
- Se funda en 2015 la Asociación Costarricense de Biogás.
- Chile arranca con su Programa Biogás Lechero en Chile (2014)
- 2017 Ecuador y Guatemala se preparan para iniciativas nacionales en biogás.

Y así es como **sigue avanzando** la promoción, creación y adopción de biodigestores en Latino América y el mundo.

1.3. Procesos bioquímicos (y fisicoquímicos) en el biodigestor

Está claro que los biodigestores, por la intervención microbiana, descomponen material orgánico en biogás y biofertilizante. Pero **¿Cómo ocurre esta fermentación o descomposición anaerobia?**

Existen cuatro grupos tróficos reconocidos por la comunidad científica, que puede variar levemente entre autores. La materia orgánica (carbohidratos, proteínas y lípidos), se va descomponiendo desde sus formas más complejas, hasta formas más sencillas, hasta llegar a metano por medio de dos vías metabólicas. La Imagen 3 muestra un diagrama de este proceso, identificando cada grupo trófico y los subproductos.



1. **Bacterias acidogénicas**
   1.1. Bacterias hidrolíticas
   1.2. Bacterias fermentativas
2. **Bacterias acetogénicas**
3. **Bacterias homoacetogénicas**
4. **Bacterias metanogénicas**
   4.1. Bacterias metanogénicas hidrogenotróficas
   4.2. Bacterias metanogénicas acetoclásticas

Imagen 3. Grupos tróficos y vías metabólicas reconocidas actualmente.

Fuente: (Wellinger, 2013)

¿Cómo es esto práctico? Entender el proceso de degradación permite establecer prácticas de operación que optimicen el biodigestor, para la toma de decisiones, o bien, sirven para el entendimiento más amplio de conceptos como la velocidad de carga orgánica y el tiempo de retención hidráulica.

Por citar un ejemplo, la etapa 1.2 de bacterias fermentativas, producen ácidos orgánicos como el ácido propiónico, y butírico (y luego a ácido acético), cargando el biodigestor de ácidos, que pueden potencialmente reducir el pH. Las bacterias metanogénicas, de las etapas subsecuentes, son sensibles a un pH bajo, por lo que pueden inhibirse de trabajar eficientemente, dejando así de producir metano. Para evitar esto, se debe cuidar la cantidad de sustrato que se alimenta al biodigestor, y asegurar que haya una población amplia y saludable de bacterias metanogénicas que puedan procesar estos ácidos en metano.

No mencionados en Imagen 3, también existen bacterias reductoras de sulfatos, que usando compuestos multicarbonos, CO_2, hidrógeno y acetato (Wellinger, 2013), producen sulfuro de hidrógeno, causante de las características ácidas y de olor a huevo podrido en el biogás.

1.4. Parámetros en un biodigestor

En línea con lo discutido en la sección anterior, la digestión anaerobia es un proceso meramente liderado por microorganismos, por lo que hay que asegurar que estos estén en sus condiciones adecuadas. Cada grupo trófico tiene condiciones óptimas distintas, pero en lo general las bacterias metanogénicas son el grupo trófico con mayor sensibilidad. A continuación, se hace una breve mención de algunos parámetros a considerar, que pueden ser monitoreados, junto con sus valores adecuados.

1.4.1. Temperatura

La temperatura tradicionalmente es separada en tres grandes grupos: psicrofilia (<20°C), mesofilia (>20° pero < 42°C) y termofilia (>42° pero <55°C) (Al Seadi, 2008). Más que un efecto sobre la velocidad metabólica de los microorganismos, que indudablemente es directamente proporcional a la temperatura, también tiene efectos en la solubilidad de los gases en el biogás (ej. más CO_2 se disuelve en la fracción liquida del biodigestor a menores temperaturas), y la viscosidad en el sustrato (“más líquido” a mayor temperatura – mejora transferencia de masas y manipulación del material).

Algunos autores recomiendan no variar la temperatura en ±2°C, lográndolo con sistemas de control y adición de artefactos para calentar el biodigestor, esto según Al Seadi (2008) para evitar

estrés a las bacterias metanogénicas. Otros sugieren operar a temperaturas "ambiente" con variaciones más altas entre el día y la noche, demostrando que el estrés no es significativo con bacterias climatizadas a estas condiciones (Marti Herrero, 2017).

1.4.2. AGV, alcalinidad y pH

La estabilidad de un biodigestor puede ser dada por la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), pues su acumulación puede llevar a una caída en el pH del biodigestor (Al Seadi, 2008). El pH, fácilmente medible con un phímetro, es un parámetro altamente monitoreado. Las bacterias metanogénicas son más sensibles a valores bajos (acidez) por lo que se recomienda operar en rangos entre 6,5 y 8,2 (Speece, 2008).

Sin embargo, altas concentraciones de AGV no siempre se reflejan en el pH, gracias a la capacidad buffer o tampón del biodigestor (Al Seadi, 2008). El sistema buffer de un biodigestor es dado por el sustrato utilizado. Por ejemplo, el estiércol vacuno tiene altas concentraciones de buffer natural (Al Seadi, 2008), y sustratos con alta proteína degradan a amonio que también incrementan la capacidad buffer.

La capacidad buffer o alcalinidad de bicarbonato es la medida de la concentración total de bicarbonato (HCO_3^-) en el biodigestor, capaz de neutralizar ácidos y mantener un pH cercano a neutralidad.

Entender la relación entre **AGV : alcalinidad** y el pH, junto con los grupos tróficos involucrados es importante. Por debajo de pH 6,6, las bacterias metanogénicas se inhiben, llevando así una acumulación excesiva de ácidos y un falló por completo del biodigestor. En este escenario no hubo una alcalinidad suficiente para contrarrestar los ácidos formados o, por otro lado, pudo haber una excesiva alimentación, llevando a la formación de más ácidos de lo que la alcalinidad podría soportar.

Una forma **práctica** de interpretar esto es con un análisis de la proporción entre AGV y alcalinidad, conocido en alemán como "FOS y TAC". Esto se puede realizar con un proceso sencillo de titulación con ácido sulfúrico al 0,1 N hasta pH 5 (mL de ácido x 250 = **FOS**), y luego nuevamente hasta pH 4,4 ([mL de ácido x 1,66 - 0,15] x 500 = **TAC**) (Lossie U., 2008). La división entre FOS/TAC, debería estar entre 0,3 y 0,4 – superior a 0,4 el reactor está siendo sobrealimentado y se deben

de tomar acciones, mientras que inferior a 0,3 aún se puede alimentar más el reactor (Lossie U., 2008) (Wellinger, 2013).

1.4.3. Nutrientes, elementos traza e inhibición

Los microorganismos necesitan nutrientes como componentes de sus tejidos celulares. Tradicionalmente se ha recomendado el requerimiento de macronutrientes como el **carbono : nitrógeno : fosforo : azufre** en una proporción de **600:15:5:1** (Al Seadi, 2008). También, (Speece, 2008) hace una amplia explicación del requerimiento de algunos elementos traza como hierro, níquel, cobalto, selenio, molibdeno y tungsteno. Como aporte adicional, ofrece la siguiente tabla en relación con requerimiento nutritivo en un biodigestor (Rittmann, 2012).

Tabla 1. Listado de macro y micronutrientes para el tratamiento anaeróbico.

Elemento	Requerimiento (mg/g DQO)
Macronutrientes	
Nitrógeno	5-15
Fosforo	0,8 - 2,5
Azufre	1-3
Micronutrientes	
Hierro	0,03
Cobalto	0,003
Níquel	0,004
Zinc	0,02
Cobre	0,004
Manganeso	0,004
Molibdeno	0,004
Selenio	0,004
Tungsteno	0,004
Boro	0,004
Cationes*	
Sodio	100-200
Potasio	200-400
Calcio	100-200
Magnesio	75-250

Fuente: (Rittmann, 2012)

Muchas de estas sustancias, de la misma forma que son necesarias para la digestión, pueden también ser inhibitorias en exceso. Algunos metales pesados (Cu^{++} y Zn^{++}) y iones (Na^{+}, NH_4^{+}, K^{+} y Ca^{+}) han demostrado inhibir el proceso. Biocidas, pesticidas y antibióticos han mostrado también tener una influencia negativa en un biodigestor (Wellinger, 2013).

2. Sustratos y sus características

El biodigestor es una la tecnología con gran capacidad de aceptar variedad de sustratos. Tradicionalmente los biodigestores han operado con estiércol de animales (principalmente vacuno), pues es un sustrato fácilmente disponible y con características muy nobles (alto en nutrientes, alcalinidad natural, con microorganismos anaeróbicos incorporados), sin embargo, también se han desarrollado proyectos con todo tipo de sustratos orgánicos. Seguido se discuten algunos aspectos generales del impacto y características de sustratos para un biodigestor.

Imagen 4. Ejemplo de diferentes sustratos utilizados para la digestión anaerobia. a) aguas rojas de un matadero, b) sueros lácteos, c) estiércol de ganado lechero, d) citropulpa del procesamiento del cítrico, e) agua residual de una granja de cerdos, f) residuos sólidos urbanos.

Fuente: (Viquez J. , 2009-2018)

2.1. Impacto del sustrato en el biodigestor

Cada sustrato es diferente, tanto en su consistencia física (fibroso a líquido) como en su composición química (sólidos totales, sólidos volátiles, etc). En el proceso de analizar el uso de un biodigestor para producir energía o dar tratamiento a un sustrato en particular, lo más importante que se debe considerar es que el biodigestor tenga la capacidad tecnológica para soportar el sustrato. En otras palabras, el tipo de biodigestor debe ser seleccionado correctamente, pues sería un error, por ejemplo, utilizar un

biodigestor diseñado para sustratos altamente diluidos (como aguas negras) con un sustrato muy sólido como residuos orgánicos domiciliarios. Entre otros aspectos que se debe considerar se encuentran:

- **Disponibilidad**: Se debe tener claro cuanto sustrato se tiene disponible, pues por ejemplo aun con 500 cabezas de ganado de engorde en pastoreo extensivo, la disponibilidad de estiércol es muy limitada y dispersa.
- **Estacionalidad**: Se debe tener muy claro la estacionalidad del sustrato, pues el biodigestor al ser un "organismo vivo" requiere de alimentación, idealmente diaria. Por ejemplo, la broza de café es un sustrato interesante para un biodigestor, pero está disponible únicamente 6 meses en el año, durante la época de cosecha. ¿Qué se haría durante los otros 6 meses?
- **Finanzas**: Se debe tener claro el costo relacionado del sustrato pues, aunque esté disponible y con poca estacionalidad, su costo para procesar, limpiar y acondicionar para un biodigestor puede ser costoso. Por ejemplo, la llamada "basura orgánica", o residuos orgánicos domiciliarios no separados en la fuente, requieren de un alto costo para su separación previo un biodigestor.
- **Fisiología bacterial**: Algunos sustratos están previamente inoculados con los microorganismos apropiados (como el estiércol, que su naturaleza es tener bacterias metanogénicas del rumen), pero muchos otros sustratos no, por lo que se debe considerar la activación de un biodigestor para asegurar que se proporcionan los microorganismos adecuados. Otros sustratos, tienen microorganismos patógenos que deben ser manejados apropiadamente, como las aguas negras.
- **Propósitos**: Se debe tener muy claro cuál es el propósito por el cual se realiza el biodigestor, siendo los principales la producción de energía y el saneamiento. En muchos casos, se logran ambos, como una granja de cerdos que trata sus residuos con un biodigestor y produce energía para su granja. Pero en otros, como aguas negras siendo tratadas en un biodigestor, la producción de biogás es mínima; por lo que se recomienda agregar otros sustratos (co-digestión) para aumentar la cantidad de biogás, lo que reducirá el efecto de saneamiento en el biodigestor.

Tener claro cuando el biodigestor es una tecnología apta es clave, pues aunque es un concepto incomparable, no sería lógico recomendar un biodigestor para aserrín, si talvez sea mejor gasificarlo o compostarlo, por ejemplo. La Imagen 5 muestra una forma cualitativa para guiarse cuando usar un biodigestor.

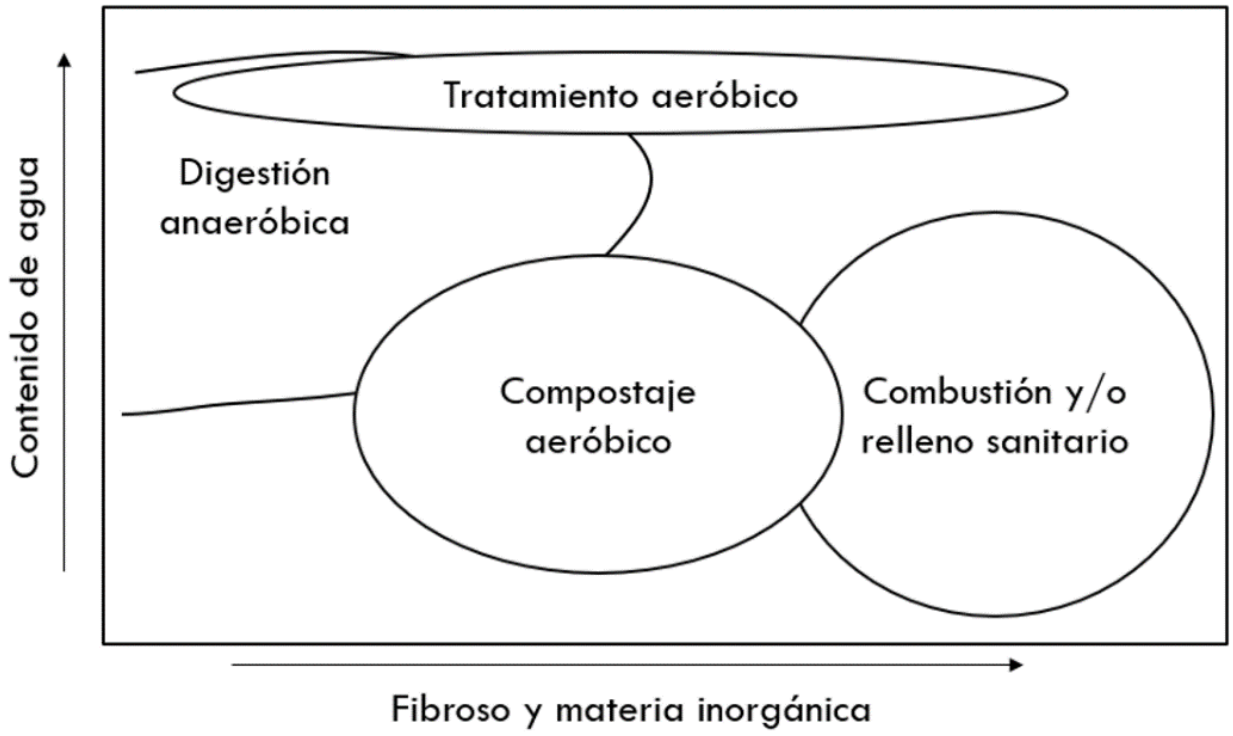


Imagen 5. Análisis cualitativo de las tecnologías apropiadas para el manejo de sustratos orgánicos.

Fuente: Traducción al español de (Wellinger, 2013)

2.2. Parámetros y características de un sustrato

Para entender la diferencia entre uno u otro sustrato hay tener claridad sobre los rangos en que operan los diferentes tipos de biodigestores, o simplemente entender los parámetros que caracterizan a los sustratos. El sustrato en estudio puede ser muestreado y enviado a un laboratorio para su respectivo análisis. El muestreo debe ser consecuente con la homogeneidad y/o heterogeneidad del sustrato, que permita tener un resultado representativo. Standard, (Standard, V. D. I., 2006) hace una amplia discusión del proceso de muestreo. Los principales parámetros son:

Solidos totales, o materia seca: Se refiere a la fracción seca de un sustrato, o sea la materia seca menos el agua (Wellinger, 2013). Esto se realiza secando la muestra. Usualmente es reportado en % o mg/L – *Por ejemplo, 1 kg de estiércol vacuno, con 15% de ST, tiene 0,15 kg de ST.*

Enfoque práctico: Sirve de guía para saber qué tipo de biodigestor utilizar, o si se requiere dilución. Ejemplo el estiércol vacuno con 15% de ST, no puede ser procesado en un biodigestor flexible, por lo que tradicionalmente es diluido “4:1” para diluir los ST a 3%.

Solidos volátiles, o materia orgánica seca: Se refiere únicamente a la fracción orgánica de la materia seca o sólidos totales. Se obtiene por incineración a 550°C (Wellinger, 2013). Usualmente es reportado en % en base seca – *Por ejemplo, siguiendo el mismo ejemplo de ST, el mismo kg de estiércol vacuno, con 0,15 kg de ST y 85% de SV, tendría entonces (0,15 x 85%) 0,13 kg de SV.*

Enfoque práctico: SV es la proporción que será descompuesta en metano, por lo que sirve para estimar la carga orgánica diaria del sistema (kg SV/d) basado en el tipo de biodigestor a degradar, su tamaño requerido. También es la base para conocer cuanto biogás máximo se puede generar.

Demanda química de oxígeno: Muy similar a SV, se refiere a la fracción orgánica, pero usando un método de oxidación total, o sea conociendo el contenido energético total (Wellinger, 2013). Es principalmente utilizado para aguas residuales.

Enfoque práctico: Al igual que en SV, DQO es la proporción que será descompuesta en metano, por lo que sirve para estimar la carga orgánica diaria del sistema (kg DQO/d), y basado en el tipo de biodigestor a degradar, su tamaño requerido. También es la base para conocer cuando biogás máximo se puede generar, usando la base de 0,35 m^3 CH_4/kg DQO degradado (Van Lier, n.d.).

pH y alcalinidad natural: Ya mencionado en secciones previas, pH mide la "acidez" de una sustancia, expresado en valor de 01 a 14. La alcalinidad, por otro lado, permite saber que tanta capacidad buffer tiene naturalmente el sustrato, tradicionalmente expresado en mg/L de $CaCO_3$.

La Tabla 2 muestra una lista de sustratos típicos en la digestión anaerobia, con sus respectivas características, además de su rendimiento de biogás (más amplio en la sección anterior).

Tabla 2. Lista de sustratos típicos para la digestión anaerobia con sus características principales.

Sustrato	Contenido	C:N	ST (%)	SV (%bs)	BMP (m^3 biogás/kg SV)	Impurezas
Aceite de pescado	30-50% lípido	-				
Cascara de papa	Carbohidratos y Proteína		25	79		
Contenido ruminal	Carbohidratos, Proteína y lípido	3 a 5	15	80	0,4 a 0,68	Tejido animal
Desechos de cocina	Carbohidratos, Proteína y lípido		25	75		
Desechos vegetales	Carbohidratos, Proteína y lípido		15	85		
Ensilaje de pasto	Carbohidratos y Proteína	10 a 25	15 a 25	90	0,56	Arena
Estiércol cerdo	Carbohidratos, Proteína y lípido	3 a 10	3 a 8	70 a 80	0,25 a 0,50	Arena, aserrín, agua
Estiércol de ave	Carbohidratos, Proteína y lípido	3 a 10	10 a 30	80	0,35 a 0,6	Arena, plumas
Estiércol de vaca	Carbohidratos, Proteína y lípido	6 a 20	5 a 12	80	0,2 a 0,30	Suelo, agua, aserrín
Glicerina	Carbohidrato		98	90		Plástico, metal, vidrio, etc.
Grasas (trampas)	lípido		10	70		
Lodo primario	65-70% Proteína 30-35% lípido	-				Tejido animal
Melaza	Carbohidratos		80	95		
Paja	Carbohidratos y lípido	80 a 100	70 a 90	80 a 90	0,15 a 0,35	Arena
Pan viejo	Carbohidratos		90	96		
Residuos de fermentación	Carbohidratos	4 a 10	1 a 5	85 a 95	0,35 a 0,78	Residuos de fruta no degradables
Residuos de fruta		35	15 a 20	75	0,25 a 0,50	
Residuos de jardinería		100 a 150	60 a 70	90	0,20 a 0,050	Suelo y compuestos celulósicos
Suero lácteo	75-80% lactosa 20-25% Proteína	-	8 a 12	90	0,35 a 0,80	Impurezas del transporte
Zacates		12 a 25	20 a 25	90	0,55	Arena y suelo

Fuente: (Al Seadi, 2008)

La Tabla 2 muestra un listado amplio de sustratos con sus respectivos rendimientos. El rendimiento es expresado como la cantidad (volumen) de biogás (o metano) que puede producir este sustrato (o la masa de solidos volátiles), bajo un procedimiento estándar; preferible con un inoculo adaptado bajo las condiciones reales de operación. El cálculo es esencialmente, la estimación primero de la cantidad de estiércol que se puede generar, y luego la estimación de la cantidad de materia orgánica seca (multiplicando la materia fresca por los ST% y luego por los $\%SV_{bs}$). La masa total de materia orgánica seca es multiplicada por el rendimiento del sustrato, obteniendo así la cantidad de biogás. Un ejemplo de un cálculo completo se puede apreciar en el anexo 2.

3. El biogás, su generación, acondicionamiento y uso

El biogás es indudablemente uno de los productos de mayor interés en la tecnología de los biodigestores; nunca se deja de percibir una sensación de "magia" al utilizar el biogás proveniente de la descomposición de un residuo. Este capítulo abarca la forma para estimar la cantidad de biogás, algunas consideraciones para su aprovechamiento y una mención de los usos más utilizados.

3.1. Estimación de la cantidad de biogás

Conocer la cantidad de biogás, es crítico para determinar cómo se puede utilizar pues, por ejemplo, el estiércol de una vaca no será suficiente para generar electricidad para un hogar, pero sí para cocinar. Aunque indudablemente la cantidad de biogás que se puede generar es debido al sustrato (Wellinger, 2013), existen algunos factores ambientales y operaciones que influyen. Es común encontrar referencias que hagan una estimación del biogás en base al volumen del biodigestor (Garfí, 2016), pero sin un dominio avanzado en este tema es fácil sobreestimar o subestimar la cantidad de biogás.

Como primer acercamiento, (Buswell, 1952) propone una ecuación que permite estimar la cantidad de biogás si se conoce la composición molecular del sustrato:

Ecuación 1. Estimación de la cantidad de metano en base a la composición molecular del sustrato.

$$C_aH_bO_c + \left(a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right)H_2O \rightarrow \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4}\right)CH_4 + \left(\frac{a}{2} - \frac{b}{8} + \frac{c}{4}\right)CO_2$$

Fuente: (Buswell, 1952)

Esta ecuación permite, por ejemplo, determinar que el lodo primario con una composición de $C_{10}H_{19}O_3N$ (Rittmann, 2012) puede generar 0,90 m^3 CH_4/kg SV con un biogás con 66% CH_4 (ver calculo completo en Anexo 1). La ecuación de (Buswell, 1952) ha sido mejorado por varios autores en las siguientes ecuaciones:

Ecuación 2. Estimación de la cantidad de metano en base a la composición molecular del sustrato

$$\mathrm{C_nH_aO_bN_d} + \left(n - \frac{a}{4} - \frac{b}{2} + \frac{3d}{4}\right)\mathrm{H_2O} \rightarrow \left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3d}{8}\right)\mathrm{CH_4} + \left(\frac{n}{2} - \frac{a}{8} + \frac{b}{4} + \frac{3d}{8}\right)\mathrm{CO_2} + d\,\mathrm{NH_3}$$

Fuente: (Van Lier, n.d.)

Ecuación 3. Estimación de la cantidad de metano en base a la composición molecular del sustrato

$$C_nH_aO_bN_c + \left(2n + c - b - \frac{9df_s}{20} - \frac{df_e}{4}\right)H_2O \xrightarrow{yields} \frac{df_e}{8}CH_4 + \left(n - c - \frac{df_s}{5} - \frac{df_e}{8}\right)CO_2 + \frac{df_s}{20}C_5H_7O_2N + \left(c - \frac{df_s}{20}\right)NH_4^+ + \left(c - \frac{df_s}{20}\right)HCO_3^-$$

Fuente: (Rittmann, 2012)

Aunque el uso de estas ecuaciones no es tan práctico, permiten demostrar que la calidad del biogás (concentración de metano) es por el tipo de sustrato (específicamente el estado de oxidación del carbono; (Van Lier, n.d.)). Una estrategia más tradicional es utilizar los ***rendimientos de biogás*** *de sustratos. Este rendimiento es el resultado de un análisis de laboratorio, donde se analiza la fermentación anaerobia de un sustrato, haciendo mediciones del biogás que es capaz de generar. Se recomienda la lectura de la metodología (Standard, V. D. I., 2006). Un ejemplo de dicha prueba se puede apreciar en la imagen 6.*

Imagen 6. Ejemplo de un set experimental donde se realiza una prueba de rendimiento de metano siguiendo la metodología de (Standard, V. D. I., 2006). Universidad EARTH.

Fuente: (Viquez J. , 2009-2018)

No sobra mencionar que, para el caso de aguas residuales, donde no se utilizan parámetros como SV, pero en su defecto DQO, se puede utilizar el rendimiento de metano como 0,35 m^3 CH_4/kg de DQO degradado (Speece, 2008). En el Anexo 3 se puede ver un ejemplo de esta metodología.

3.2. Características de biogás

Una vez conocido la cantidad de biogás que se puede generar, es importante conocer las características de este que permitan ser una base para su aprovechamiento. Las siguientes tablas ofrecen información útil para capítulos posteriores. La Tabla 3 muestra la composición del biogás, mientras que la Tabla 4 algunas características de éste. La Tabla 5 ofrece una comparación con otros combustibles, útil como referencia y comparación.

Tabla 3. Composición típica del biogás.

Parámetro	Contenido (%vol)
Metano, CH_4	50-75
Dióxido de carbono, CO_2	25-45
Vapor de agua, H_2O	2-7
Oxígeno, O_2	<2
Nitrógeno, N_2	<2
Amoniaco, NH_3	<1
Hidrogeno, H_2	<1
Sulfuro de hidrógeno, H_2S	<1

Fuente: (Al Seadi, 2008)

Tabla 4. Características del biogás asumiendo 58% CH_4 y 42% CO_2, saturado de agua a 30°C y 1 atm de presión.

Parámetro	Valor	Rango	Unidad
Entalpía de la combustión (H)	21,5	20,1 a 25,9	MJ/m^3
Peso molecular	27,35	24 a 29	g/mol
Densidad (*p*)	1,0994	0,96 a 1,17	kg/m^3
Gravedad especifica (gs)	0,94	0,82 a 1,00	-
Viscosidad (ɥ)	$12,97x10^{-6}$	-	kg/m.s
Aire:Biogás ideal	5,52 : 1	15% biogás	
Límites de flamabilidad	9% a 17% biogás en aire		
Numero de Wobbe (W)	22,2	-	MJ/m^3
Velocidad de flama	0,25	-	m/s en aire

Fuente: (Fulford D. , 2015)

Tabla 5. Tabla de equivalencias energéticas de 1 Nm^3 de biogás con 65% de metano con un poder calorífico de 22,4 MJ/m^3.

Parámetro	Equivalente
Gas natural	0,6 m^3
Gas licuado de propano	0,88 L o 1 lb
Butano	0,79 L
Gasolina	0,63 L
Diesel	0,61 L
Carbón	0,71 kg
Madera o leña	1,61 kg
Electricidad	1-2 kWh

Fuente: (Walsh, 1988)

3.3. Acondicionamiento y manejo del biogás

Una vez generado el biogás, dependiendo de la forma en que es este acumulado en el biodigestor se deben tomar algunas consideraciones antes de su uso final. A continuación, se discutirá la conducción del biogás y medidas de seguridad, principalmente válvulas de alivio, así como el filtrado, según el uso final.

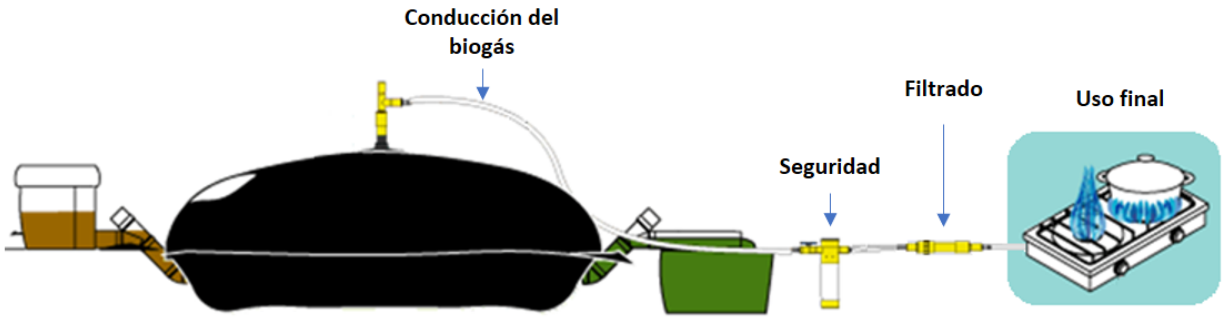


Imagen 7. Ilustración de un biodigestor, su conducción, seguridad, filtrado y uso final. Imagen del biodigestor ofrecido por la empresa Sistema Biobolsa.

Fuente: (Buen manejo del campo; Sistema BioBolsa, 2018)

3.3.1. Conducción del biogás

El biogás fluirá por la tubería por el gradiente o diferencia de presión (Fulford D. , 2015) y no por diferencia de altura, pues la gravedad no influye significativamente. Es recomendable conducir el biogás usando tuberías de materiales resistentes a la corrosión. Tradicionalmente, en proyectos pequeños se utiliza plásticos como el PVC y polietileno, y en proyectos de mayor escala y con exigencias reglamentarias se utiliza acero inoxidable. Debido a que el agua del biogás se condensa durante la noche (por baja en la temperatura), la conducción de biogás debe instalarse con un pendiente mínimo de 1%, y colocar desfogues de aguas de condensados en los puntos más bajos. La Imagen 8 muestra algunos ejemplos.

Imagen 8. Ejemplo de instalaciones de biogás realizadas correctamente. a) corresponde a biogás conducido en poliducto (polietileno) en 1''Ø con un punto de desfogue. b) corresponde a un alinea de biogás en tubería en PVC en 2' Ø', con soportes permitiendo una correcta alineación.

Fuente: (Viquez J. , 2009-2018)

Ahora bien, el biogás al viajar por la tubería pierde presión debido a la fricción. Si la perdida de presión es mayor a la presión en el biodigestor, el biogás no llegará al extremo opuesto de la tubería. Se sabe que a mayor diámetro de tubería, menor es la perdida de presión. (Fulford D. , 2015) presenta un procedimiento para estimar está perdida de presión basado en una modificación de la ecuación de Darcy-Weisbach, que permite decidir el diámetro de tubería adecuado para el proyecto.

Ecuación 4. Fórmulas para estimar la perdida de presión en una tubería que conduce biogás.

$$\Delta P = f^* \cdot \frac{L}{\emptyset} \cdot \frac{p \cdot \mu^2}{2}$$

$$Re = \frac{\emptyset \cdot \mu}{v} \text{ por lo que ; } Si\ Re < 2000\text{: } f^* = \frac{64}{Re}\text{, o } Si\ Re > 4000\text{: } f^* = \frac{0{,}316}{\sqrt[4]{Re}}$$

$$\mu = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \emptyset^2}$$

Donde:
f: corresponde a la perdida de fricción, dada según el número de Reynold (Re)*
L: Corresponde al largo de la tubería (en m)
Ø: Corresponde al diámetro de la tubería (en m)
p: Corresponde a la densidad específica del biogás 1,0944 kg/m^3
μ: Corresponde a la velocidad del biogás (m/s)
v: viscosidad cinemática 1,797 x 10^{-5} Pa.s
Q: Corresponde al flujo de biogás (m^3/hr)

Fuente: (Fulford D. , 2015)

La aplicación de la formula puede ser compleja y tediosa para los no experimentados, por lo que la siguiente tabla presenta la perdida de presión, en mbar, para diferentes diámetros de tubería y flujos de biogás, por cada metro de distancia. Como un ejemplo, un escenario donde se quiera conducir el biogás 150 m en una tubería de ½'', para alimentar una cocina industrial que consume 1,5 m^3/hr de biogás, la perdida de presión sería de (2,1 mbar/m x 150 m) 315 mbar. Para un biodigestor flexible está perdida de presión es muy alta, y se deberá utilizar un mayor diámetro.

Otra forma de resolverlo es utilizar la presión máxima que está dispuesto a perder (por ejemplo 10 mbar para un biodigestor flexible), dividirlo por el largo (150 m), obteniendo la perdida máxima por metro lineal (0,07 mbar/m). Viendo la tabla, a un flujo de 1,5 m^3/hr, el diámetro que se acerca más es 1'' o 1½''.

Tabla 6. Estimación de la perdida de presión en mbar por cada metro lineal de tubería, según el flujo y diámetro de la tubería.

Flujo de biogás (m^3/hr)	Diámetro de tubería en pulgadas (mm)						
	3/8'' (9,5 mm)	0,5'' (12,7 mm)	3/4'' (19 mm)	1'' (25,4 mm)	1·1/2'' (38,1 mm)	2'' (50,8 mm)	3'' (76,2 mm)
0,5	1,4	0,4	0,1	0,03	0,01	0,00	0,00
1	4,1	0,9	0,2	0,05	0,01	0,00	0,00
1,5	8,4	2,1	0,3	0,08	0,02	0,01	0,00
2	13,8	3,5	0,5	0,11	0,02	0,01	0,00
2,5	20,4	5,2	0,8	0,13	0,03	0,01	0,00
3	28,1	7,2	1,0	0,27	0,03	0,01	0,00
3,5	36,8	9,4	1,4	0,35	0,04	0,01	0,00
4	46,5	11,9	1,7	0,44	0,06	0,01	0,00
4,5	57,2	14,6	2,1	0,54	0,08	0,02	0,00
5	68,7	17,5	2,6	0,65	0,09	0,02	0,00
5,5	81,2	20,7	3,0	0,77	0,11	0,03	0,00
6	94,6	24,1	3,5	0,90	0,13	0,03	0,00
6,5	108,8	27,7	4,0	1,03	0,15	0,04	0,00
7	123,8	31,6	4,6	1,17	0,17	0,04	0,00
7,5	139,7	35,6	5,2	1,32	0,19	0,05	0,00
8	156,4	39,9	5,8	1,48	0,22	0,06	0,01
8,5	173,9	44,4	6,5	1,65	0,24	0,06	0,01
9	192,2	49,0	7,1	1,82	0,27	0,07	0,01
9,5	211,3	53,9	7,9	2,00	0,29	0,07	0,01
10	231,2	58,9	8,6	2,19	0,32	0,08	0,01

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Válvulas de seguridad (o presión) (o alivio)

Las válvulas de seguridad, también conocidas como válvulas de presión o de alivio, son dispositivos que previenen un daño al biodigestor por exceso de presión. Cada biodigestor soporta diferentes niveles de presión por lo que la válvula que se diseñe para tal fin debe ser adecuadamente seleccionada.

Imagen 9. Válvulas de presión utilizadas comúnmente en biodigestores flexibles. a) tubería sumergida en botella de plástico con 10 cm de columna de agua (CA), b) válvula de alivio fabricada con PVC para uso comercial con 4 cm de CA por la empresa Viogaz, y c) válvula de alivio fabricada con PVC para uso comercial por la empresa Sistema BioBolsa.*

**1 cm de columna de agua equivale a 1 mbar.*

Fuente: (Viquez J. , 2009-2018)

3.3.3. Filtrado

El filtrado del biogás es un tema bastante amplio, controversial, y a veces una de las principales barreras para un uso efectivo del biogás. La Tabla 7 muestra como referencia el requerimiento de filtrado según el uso final del biogás, aunque en algunos casos las exigencias, por ejemplo, para motores de combustión interna, son más altas.

Tabla 7. Rangos recomendaciones de filtración del biogás, según el uso final.

Uso	H_2S (ppm)	CO_2	Polvo	H_2O
Quemador de gas, o caldera	< 1.000	-	-	Remoción recomendada
Motor de combustión interna	< 460-800	Min LHV 13-21 MJ/m^3	< 50 mg/m^3	Humedad < 70-80%
Celda de combustible	<10	-	Remover	
Uso vehicular	Max 15	Max 3% vol.		Max 32 mg/m^3
Inyección a red gas natural	< 3	-	Remover	Punto de rocío en -10°C

Fuente: (Reith, 2003)

El filtrado tiene como pilar la remoción de aquellos compuestos en el biogás con características corrosivas, como el sulfuro de hidrógeno. La Imagen 10 muestra un ejemplo de este daño en un motor de combustión interna.

Imagen 10. Daño evidente en los cabezotes de un motor, por la falta de filtración del biogás.

Fuente: Imagen compartida por Martin Machinery, USA (2009)

Existen variedad de tecnologías para remoción del $H_2S_{(g)}$. Aprovechando la afinidad química del $H_2S_{(g)}$ con cationes metálicos, algunos proyectos utilizan agregar cloruro de hierro en el líquido del biodigestor, promoviendo una precipitación del $H_2S_{(g)}$ en la solución (y por ende una disminución de su concentración en el biogás).

Otros proyectos hacen la purificación adsorbiendo el $H_2S_{(g)}$ en adsorbentes sólidos colocando filtros externos cargados con sustratos o materiales filtrantes[3] conocidos por su capacidad de adsorción. La Imagen 11 muestra un ejemplo de este tipo de sistemas de filtrado. En el Anexo 4 se puede ver un ejemplo de un cálculo típico para estimar la cantidad de material filtrante requerido para remover sulfuro de hidrogeno en el biogás. No sobra mencionar que la alambrina, esponja de hierro, o productos similares, no son efectivos para la remoción de $H_2S_{(g)}$ y han sido divulgados erróneamente por algunas décadas.

También, existe el concepto conocido como **micro aireación**. Esto es la "inyección" de oxígeno atmosférico (aire) en la parte gaseosa del biodigestor, en el extremo opuesto a la salida del biogás. Aunque suene contradictorio con la necesidad que un biodigestor sea "anaeróbico", agregar pequeñas cantidades de oxígeno atmosférico, puede promover el desarrollo de bacterias sulfo-oxidantes (ej *Thiobacullis sp*) capaces de oxidar el $H_2S_{(g)}$ en azufre elemental, sin afectar bioquímicamente el proceso de producción de metano. Las cantidades recomendadas son entre un 2% hasta un 7,5% de la producción de biogás diaria, agregado de forma intermitente o continua. Por ejemplo, un proyecto con una producción estimada de 10 m^3 de biogás diarias, debería inyectar (10 m^3/d x 2%) 0,2 m^3 de aire diariamente, que equivale a 0,13 litros por minuto – algunas bombas de peceras pueden ser utilizadas para este fin. La micro aireación tiene

[3] Por ejemplo, el Sulfatreat, o carbón activado. También el Iron sponge de Conelly GPM.

la capacidad de remover hasta un 80% del $H_2S_{(g)}$ en el biogás, requiriendo así menores filtros externos o tratamientos posteriores.

Imagen 11. Ejemplo de un filtro utilizando el concepto de adsorción utilizando sulfatreat, instalado en una granja porcina en Costa Rica por la empresa Viogaz.

Fuente: (Viquez J. , 2009-2018)

En la Imagen 12 se presenta un resumen cualitativo de tecnologías utilizadas para limpiar el biogás, según la cantidad de biogás que se deben limpiar y la concentración de H_2S en el biogás.

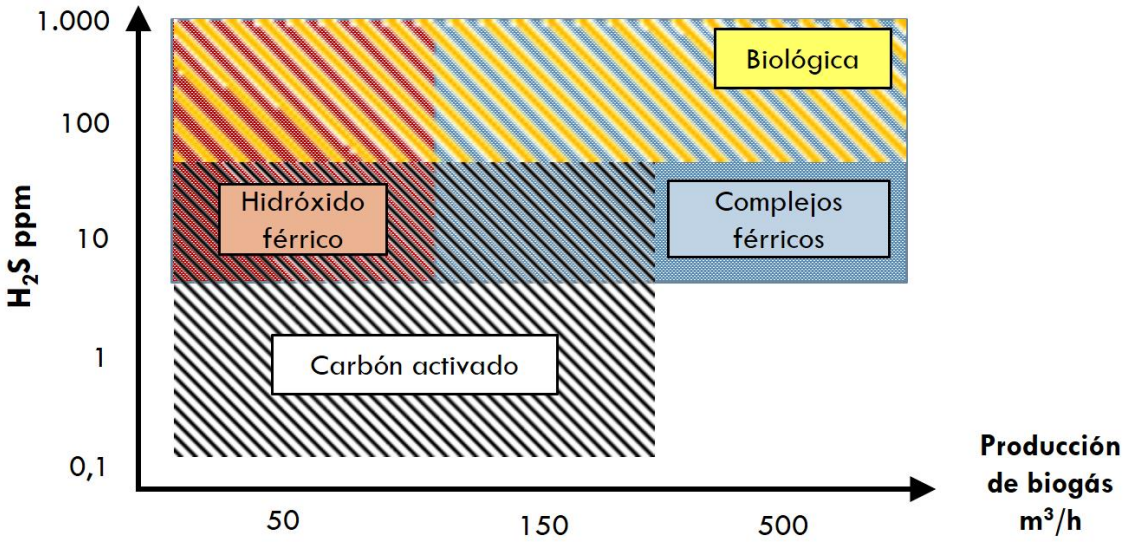


Imagen 12. Análisis cualitativo de tecnologías a utilizar, según la cantidad de biogás a filtrar y la concentración de H2S.

Fuente: (Schmack, 2004)

3.1. Usos del biogás

Para entender el aprovechamiento del biogás, es necesario entender la teoría de la combustión. La teoría de combustión establece estequiométricamente la cantidad de aire que es necesario para lograr una combustión completa del metano, y así logrando obtener la mayor cantidad de energía. La combustión del biogás se da de la siguiente forma:

Ecuación 5. Combustión del biogás con aire.

$$\underbrace{0{,}58\ CH_4 + 0{,}42\ CO_2}_{\text{Biogás}} + \underbrace{1{,}16O_2 + 4{,}36\ N_2}_{\text{Aire}} \rightarrow 1{,}0\ CO_2 + 1{,}16\ H_2O + 4{,}36\ N_2$$

Fuente: (Fulford D. , 2015)

La Ecuación 5 establece que por cada 1 L de biogás se requiere cerca de 5,7 L de aire (ver Anexo 5 para detalle de este cálculo). Esto es importante, pues indiferentemente de cómo se utilizará el biogás, el equipo (cocina, motor, etc) debe mezclar ambos (aire : biogás) en esa proporción para lograr una mayor eficiencia de combustión.

En usos térmicos, o sea de combustión directa, esto es logrado con el paso del biogás a través de un orificio, o inyector, generando un efecto Venturi, succionando aire atmosférico, para luego mezclarse previo a la combustión final. Una recomendada lectura para mayor entendimiento de estos conceptos es (Fulford D. , 2015) o (Fulford D. , 1996). La Imagen 13 muestra las fórmulas involucradas para el diseño de quemadores, esto mismo aplica para los usos térmicos mencionados adelante.

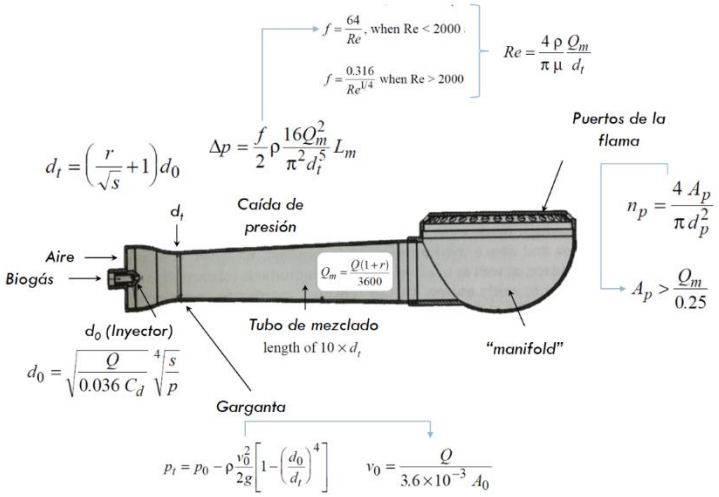


Imagen 13. Formulas involucradas para el diseño de una estufa que utiliza biogás como combustible.

Fuente: (Fulford D. , 1996)

Es por esta razón, que equipos para **gas propano,** por ejemplo, no funcionan con biogás (¡y viceversa!). Estos equipos están diseñados para una proporción de 1 L de propano para 23,8 L de aire, por lo que un equipo de estos operado a biogás igual recibiría los 23,8 L de aire, ahogando por completo la llama. Las modificaciones, por lo tanto, van en modificar la proporción aire:combustible. Usualmente van en el orden de: 1) aumentar el diámetro en el que el combustible es inyectado, y 2) reducir la entrada de aire (cerrando simplemente las compuertas).

El aumento del diámetro del combustible usualmente se hace usando un taladro y una broca adecuada. La Imagen 14 muestra la ejemplificación de este concepto. Para conocer que tanto se debe aumentar la Tabla 8 entrega un multiplicador según el combustible al cual este diseñado el equipo y la calidad del biogás. Para dar un ejemplo, una estufa a GLP que tiene un Ø de su inyector de 0,7 mm, y usando un biogás de 60% de CH_4, se debe aumentar a (0,7 mm x 1,81) 1,27 mm. Sin embargo, la experiencia del autor de este manual ha determinado la necesidad de incrementar hasta x 3,4 veces el Ø por un tema adicional de presión del biogás.

Imagen 14. a) Ejemplo de la diferencia de diámetro de inyección del combustible en un equipo de gas propano (GLP) y otro equipo similar a biogás, y b) labor de aumento del diámetro de inyección usando un taladro.

Fuente: (Viquez J. , 2009-2018)

Tabla 8. Multiplicador de los orificios de inyección en gas natural y gas licuado de propano, según la calidad del biogás (concentración de metano).

% de metano	Multiplicador de orificio	
	Gas natural (39 MJ/m^3)	Propano (93 MJ/m^3)
70	1,32	1,63
65	1,39	1,72
60	1,46	1,81
55	1,54	1,92
50	1,64	2,04

Fuente: (Ross, 1996)

Para el caso particular de motores, que presentan un grado mayor de complejidad, una práctica muy común es la modificación de su sistema de carburación, pues es por aquí donde ingresa el combustible mezclado con el aire. En un informe realizado por (Viquez J. , 2017), se presentan algunas de estas estrategias. La Imagen 15 muestra un ejemplo del cambio de una carburación de gasolina a una carburación de gas. Otros autores han utilizado otras técnicas como las mostradas en la Imagen 16. Es importante mencionar que adicional a la modificación del sistema de carburación o ingreso del combustible al motor y ajuste de la relación aire:combustible, es también recomendable cambiar el tiempo de la chispa y las prácticas de mantenimiento (Viquez J. , 2017) (Walsh, 1988).

Finalmente, entender el concepto de derrateo[4] es clave. El motor perderá potencia por factores como el cambio del potencial calórico del combustible (de gasolina, por ejemplo, a biogás), por la altura sobre el nivel del mar al que operara el equipo (menor disponibilidad de oxigeno atmosférico), la perdida de operación por una potencial disminución en las revoluciones de operación, y finalmente entender que los equipos no pueden operar al 100% de su potencial, más bien tradicionalmente a un 80%. Por tanto, escoger el tamaño del motor que se requiere es una combinación de estos 4 factores.

Imagen 15. Ilustración fotográfica, de los pasos para el cambio de un sistema de carburación de gasolina, por un sistema de carburación a gas, en un motor Briggs & Stratton de de 6,5 HP utilizado en un equipo de ordeño.

Fuente: (Viquez J. , 2017)

Imagen 16. Otros ejemplos de adaptaciones al motor para operar con biogás. a)[1] utilizando un flanger de admisión, b)[2] unidad de vacío desarrollada con impresión 3D, tomado como referencia (Von Mitzlaff, 1988), y c)[2] unidad de vacío experimental.

Fuente: [1] (Viquez J. , 2017); [2] (Patiño, 2017)

[4] Perdida de potencia del equipo.

A continuación se mencionarán algunos equipos que pueden ser utilizados con biogás, y algunas características.

3.1.1. Uso térmico del biogás

I. Iluminación ● **Descripción**: Biogás al combustionar calienta una manta capaz de irradiar luz. ● **Consumo**: 0,1 m^3/hr ● **Flujo luminoso** (268-482 Lumen), equivalente a 40 W de un bombillo incandescente ● **Presión de operación**: 20 cm CA	 *Imagen 17. Foto de una lampara operada con biogás.* *Fuente:* (Viquez J. , 2016)
II. Cocción ● **Descripción**: La combustión del biogás (la flama) entra en contacto directo con la olla. ● **Consumo**: 0,5 - 1,5 m^3/hr (según tamaño) ● **Eficiencia térmica:** 20-45% (según diseño) ● **Presión de operación**: 5 - 20 cm CA (según diseño)	 *Imagen 18. Foto de una estufa a biogás* *Fuente:* (Viquez J. , 2016)
III. Calefacción de espacio ● **Descripción**: La combustión del biogás irradia calor hacia abajo. ● **Consumo**: 0,15 m^3/hr ● **Potencia:** 3250 BTU/hr (950 W) ● **Presión de operación**: 30 cm CA	 *Imagen 19. Foto de una criadora a biogás* *Fuente:* (Viquez J. , 2009-2018)

IV. Calefacción de agua ● **Descripción**: La combustión del biogás irradia calor a un intercambiador de calor por donde fluye el agua. ● **Consumo**: ○ 0,3 – 1,2 m^3/hr Calentadores de 7 L/min ○ 1 – 2,5 m^3/hr Calentadores de 12 L/min ○ 1,5 – 3 m^3/hr Calentadores de 16 L/min ● **Eficiencia térmica:** 85-90% ● **Presión de operación**: 20 cm CA	 *Imagen 20. Foto de un calentador de agua a biogás.* *Fuente:* (Viquez J. , 2009-2018)

V. Calderas de vapor ● **Descripción**: La combustión del biogás aumenta la temperatura interna, produciendo vapor en el agua. ● **Consumo**: ND ● **Eficiencia térmica:** ND ● **Presión de operación**: 20 cm CA	 *Imagen 21. Foto de un calentador de agua a biogás.* *Fuente:* (Viquez J. , 2009-2018)

3.1.2. Uso mecánico del biogás

El uso mecánico del biogás hace referencia a lograr utilizar el biogás para accionar un motor, y que de este se logré mover variedad de equipos, desde picadoras de pasto, bombas de vacío de unidades de ordeño, molinos y hasta bombas de agua. El accionamiento se logra a través de poleas, de la misma forma que se haría con un motor eléctrico. El uso mecánico es recomendado antes de considerar la generación eléctrica y luego de haber descartado el uso térmico. La Imagen 22 muestra algunos ejemplos de aplicaciones utilizando biogás como combustible.

Imagen 22. Ejemplo de diferentes aplicaciones operadas con un motor operado a biogás, acoplado a diferentes usos: a) picadora de pasto, b) sistema de ordeño, y c) molino de masa.

Fuente: (Viquez J. , 2017)

El consumo de combustible en un motor variará dependiendo de las revoluciones y potencia a las que opera el motor. Una evaluación realizada por SNV por el Programa Nacional de Biogás (Viquez J. , 2017) reportó un consumo que va desde 1,5 m^3/hr hasta 3,5 m^3/hr. La Imagen 23 ofrece una relación entre la potencia del motor y consumo de biogás, a una revolución constante.

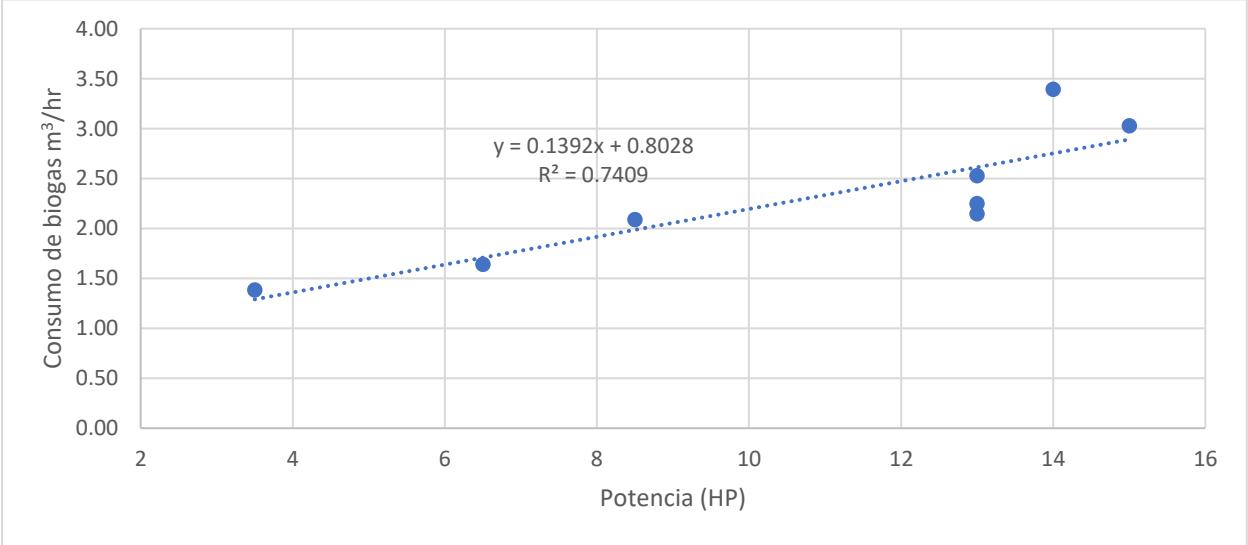


Imagen 23. Consumo de biogás según la potencia del motor.

Fuente: (Viquez J. , 2017)

3.1.3. Uso eléctrico del biogás

La generación eléctrica es una subcategoría del uso mecánico, pues al final es un motor operado a biogás, el cual acciona un generador eléctrico. Para haber logrado convertir el biogás en electricidad este debió haber pasado por 3 a 4 conversiones energéticas: de energía química en el CH_4 a cinética en el motor a eléctrica saliendo del generador, y luego nuevamente a cinética al accionar, por ejemplo, un motor eléctrico. La "*baja eficiencia"* de un generador eléctrico (con biogás o cualquier otro combustible) se da por estas conversiones, por lo que la decisión de hacer generación eléctrica es porque se ha descartado el uso térmico y el uso mecánico del biogás.

Adicionalmente, la eficiencia de un generador eléctrico también es influenciada por: a) la potencia o el tamaño del equipo (ver Imagen 24) y b) la carga con que trabaja (ver imagen 25). En otras palabras, entre más pequeño sea el generador, menor será su eficiencia. Todo generador operando cerca de su máxima capacidad o potencia tendrá mayor eficiencia. Por tanto, dimensionar adecuadamente, evitando el sobredimensionamiento, es clave para una buena eficiencia.

El consumo de biogás de un generador eléctrico tiene varias variables en juegos, como es la eficiencia eléctrica con la que esté operando (usualmente desconocida), y la potencia con la que está trabajando (no siempre una respuesta intuitiva). Haciendo algunos supuestos educados, se puede llegar a una estimación. En el Anexo 6 se puede ver un ejemplo de un cálculo similar.

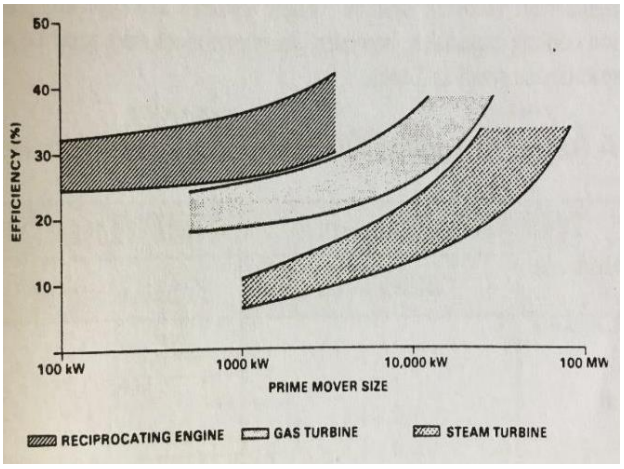


Imagen 24. Eficiencia de un generador eléctrica según la escala del generador.

Fuente: (Ross, 1996)

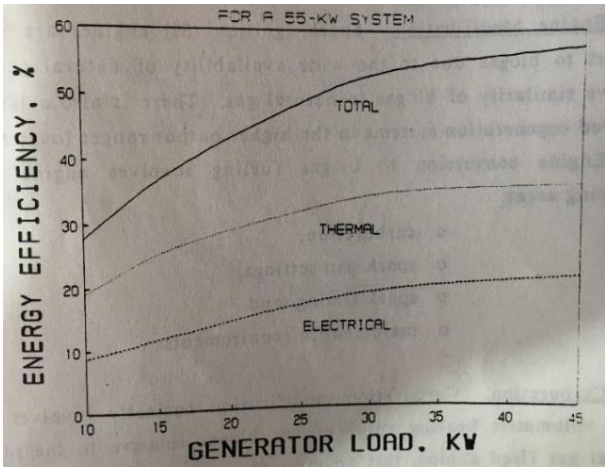


Imagen 25. Eficiencia de un generador eléctrica (y térmico) según la potencia en la que opera el equipo para un equipo de 55 kW.

Fuente: (Walsh, 1988)

Imagen 26. Ejemplo de aplicación de biogás con generadores eléctricos de varias escalas. a) generador marca GreenPower de 3,5 kW en Managua, b) generador marca Generac de 20 kW en San Carlos, Costa Rica, c) generador marca Generac de 60 kW en Guanacaste, Costa Rica y d) generador marca 2G de 200 kW en Cartago, Costa Rica.

Fuente: (Viquez J. , 2009-2018),

4. El digestato, sus características y aprovechamiento

4.1. ¿Qué es el digestato?

El digestato, o efluente, es la fracción líquida que sale del biodigestor luego de haber pasado por un proceso de fermentación anaerobia. Dado que se da un proceso de fermentación de la carga orgánica entrante, el digestato resultante se reduce considerablemente, además que se encuentra bioestabilizado. Esto justifica al biodigestor como un sistema de tratamiento de aguas residuales, y su digestato como un fertilizante de alta calidad y un material "más limpio" en comparación a cuando entró al sistema.

Desde una perspectiva agronómica el efluente es un excelente biofertilizante, pues los nutrientes han pasado por un proceso de mineralización; algunos estudios también han encontrado hasta precursores de crecimiento como tiamina, giberelina, entre otros (Hivos, 2015).

Utilizado el digestato como biofertilizante tiene el potencial de fortalecer la floración, incrementar el follaje, aumento en las cosechas, mejoramiento de la estructura del suelo, entre otros (Hivos, 2015). La

Imagen 27 muestra un ejemplo cualitativo de la diferencia de producción de follaje con y sin uso del digestato como biofertilizante.

Imagen 27. Ejemplo de la diferencia de producción de follaje gracias la uso del biol como biofertilizante. La Paz, Bolivia.

Además de beneficios agronómicos, según (Al Seadi, 2008) y (Wellinger, 2013), el digestato tiene una reducción significativa con el olor del sustrato previo a descomposición. Ofrece una reducción de patógenos y semillas de malezas.

5. Tipos de biodigestores

La categorización de los biodigestores es amplia, pues puede hacerse en base a diferentes clasificaciones (temperatura, carga orgánica), o inclusive una mezcla de estas. El biodigestor flexible ("bolsa") y el domo fijo, pareciera ser dos sistemas diferentes, pero categóricamente pertenecen al mismo grupo, lo mismo que las lagunas cubiertas (o carpadas). Por tanto, para entender los biodigestores, se deben entender los siguientes conceptos:

Velocidad de carga orgánica (Conocida en inglés como "organic loading rate" OLR): Es la cantidad de materia orgánica seca (o sólidos volátiles; o DQO) que un biodigestor es capaz de "digerir" diariamente, por unidad de volumen de éste. O sea, es una expresión de la eficiencia de un biodigestor para procesar sustratos en biogás; directamente proporcional con el nivel tecnológico del reactor. Va desde 0,01 hasta un máximo de 4 a 5 kg SV/m^3.d.

Ecuación 6. Formula que explica la velocidad de carga orgánica.

$$VCO = \frac{Q \cdot S^0}{V}$$

Fuente: (Al Seadi, 2008)

Donde:

Q: es el caudal de alimentación diaria expresada como m^3/d,

S^0 es la concentración de materia orgánica, expresado en kg/m^3 (de DQO o SV) y,

V: es el volumen líquido del biodigestor (¡ojo! No volumen total) expresado en m^3.

Tiempo de retención hidráulico (TRH): Representa el tiempo en que el sustrato permanece dentro del biodigestor. Es una relación matemática (Ecuación 7) entre el volumen del biodigestor y el caudal de entrada (Al Seadi, 2008) (puede ser el estiércol mezclado con agua, por ejemplo). En el Anexo 7 se puede ver algunos cálculos relacionados al TRH que pueden servir de guía para su interpretación. Representa la ventana de tiempo en que el sustrato puede ser degradado, y es directamente proporcional al sustrato como tal y la capacidad del biodigestor en retener los microorganismos. Va desde pocas horas hasta cientos de días.

Ecuación 7. Relación matemática del tiempo de retención hidráulico.

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Fuente: (Al Seadi, 2008)

Donde:

V: es el volumen liquido del biodigestor (¡ojo! No volumen total) expresado en m^3;

Q: es el caudal de alimentación diaria expresada como m^3/d.

Tiempo de retención celular o biomasa (TRC). A veces confundido con el TRH, este es un concepto que explica el tiempo que permanece los microorganismos dentro del biodigestor. Se debe asegurar que existe un TRC razonable para que la población de microorganismos sea saludable y suficiente para degradar el material orgánico. Tradicionalmente se sugiere dos veces el tiempo de duplicación del organismo más lento (bacterias metanogénicas) que ronda los diez días; o sea un mínimo de 20 días (Al Seadi, 2008). Si los microrganismos no fueron retenidos/adheridos hacia lo interno, o recuperados y regresados al biodigestor, el TRC es igual al TRH. Si existe fijación de biomasa, entonces se puede "desacoplar" el TRH del TRC, logrando biodigestores con potencialmente un TRH tan bajo de solo algunas horas.

Ahora bien, ya explicados estos conceptos se puede indicar que, por principio, los investigadores buscan lograr que los biodigestores sean "eficientes", o sea biodigestores que tengan la capacidad de degradar materia orgánica, produciendo el máximo de biogás posible, y hacerlo en el menor volumen necesario. Lograr esto, debe poner en una balanza socioeconómica, pues a veces es preferible perder parte de esta "eficiencia" a cambio de un menor costo de inversión y/o dificultad de operación.

Siguiendo lo anterior, los biodigestores y sus categorías han nacido, en manos de sus creadores, en el intento de estos en buscar una solución para un sustrato o condición en particular, pero siempre respetando los fundamentos de la digestión anaerobia, como por ejemplo evitar una sobre carga orgánica (VCO ajustado las condiciones de operación), a un lavado de microrganismos (manteniendo un TRC mínimo de 20 días). La Imagen 28 muestra una clasificación de biodigestores, según sus características más peculiares.

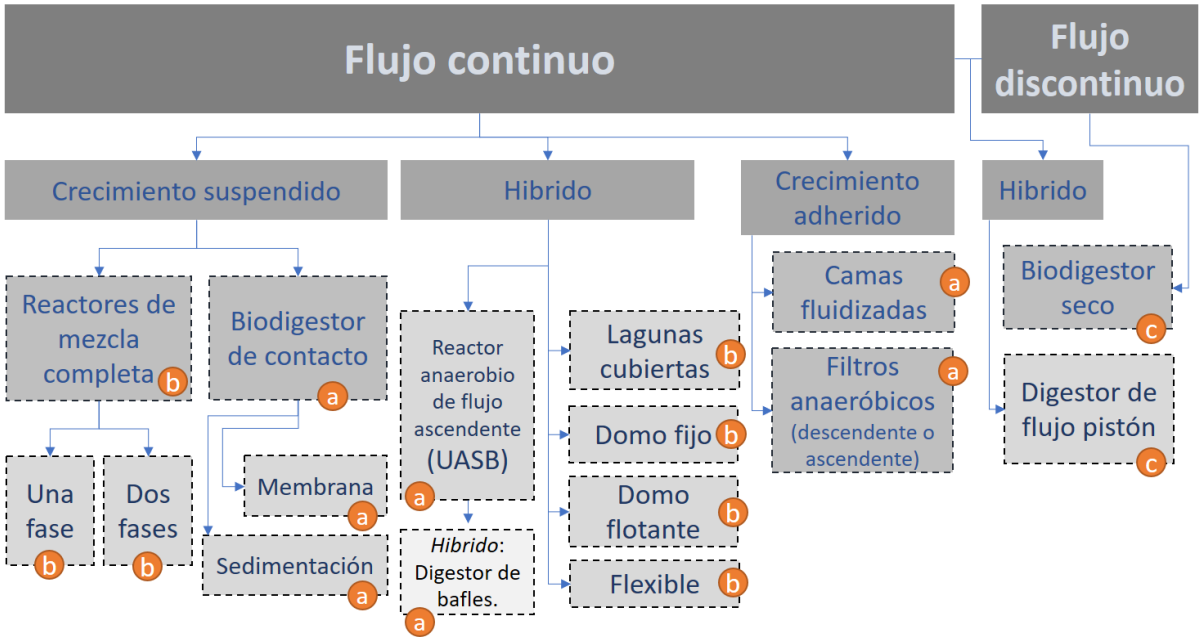


Imagen 28. Diagrama de clasificación de los diferentes conceptos de biodigestores. (a) significa que operan con sustratos líquidos, (b) sustratos líquidos con mayor contenido de sólidos, y (c) con sustratos sólidos.

Fuente: Elaboración propia con información de (Rittmann, 2012), (Ross, 1996) (Fulford D. , 2015)

Como se puede ver en la Imagen 28, la clasificación es amplia. Algunos digestores están diseñados para favorablemente digerir sustratos más líquidos como aguas residuales municipales (Imagen 4(a)), mientras que otros procesan sustratos con mayor contenido de sólidos (Imagen 4 (b, c, d y e)), y un grupo muy selecto procesa sustratos aún más sólidos (Imagen 4 (f)). Esta clasificación permite ser guía para escoger adecuadamente un biodigestor, según el sustrato e inclusive la escala; sería una pena, por ejemplo, escoger para aguas residuales municipales un biodigestor de mezcla completa, sabiendo que un reactor como el UASB, o filtros anaeróbicos son más favorables. A continuación, una breve descripción de las diferentes categorizaciones.

5.1. Por flujo (continuo o discontinuo)

La gran mayoría de biodigestores son “de flujo continuo”[5], o sea operan bajo un régimen donde el sustrato es alimentado periódicamente (diariamente usualmente). Sin embargo, en los últimos años ha emergido los biodigestores “secos” que operan bajo un régimen completamente discontinuo. Esto significa que el biodigestor es cargado una única vez, y hasta que su producción de biogás es la mínima, es limpiado y cargado nuevamente.

5.2. Crecimiento suspendido o adherido (o híbrido)

La estrategia de algunos biodigestores, principalmente cuando el sustrato está altamente diluido como las aguas residuales municipales, es retener la biomasa (microorganismos) adentro del biodigestor (crecimiento adherido). Logrando esto, pueden tener una población grande y diversa de microrganismos dentro del biodigestor, degradando así el residuo en algunas horas, y no tener que operar con un TRH alto (lo que significaría biodigestores inmensos), convirtiéndolos en **biodigestores de alta carga** (operando a altos VCO).

Cuando el sustrato, por sus características físicas (alto contenido de sólidos y suspendidos) interfiere en cualquier estrategia para retener la biomasa, se debe entonces usar una biomasa suspendida, o sea los microorganismos flotan alrededor del biodigestor junto con el sustrato. El mezclado o agitación se agrega, entre varias razones, para mejorar el contacto entre esa biomasa y el sustrato. Cuando esto ocurre, el TRH mínimo del biodigestor debe ser ajustado al TRC mínimo, o sea 20 días, pues caso contrario (si el TRH es muy bajo) ocurriría un escape o lavado de los microorganismos junto con el efluente, convirtiéndolos en **biodigestores de baja a media carga** (operan con un VCO medio a bajo).

Sumado a estas clasificaciones, también se puede también mencionar el rango de temperatura en que opera el biodigestor, por ejemplo: psicrofílico, mesofílico, o termofílico. La Imagen 29 muestra algunas fotografías ejemplificando la variedad de tipos de biodigestores.

[5] Popularmente referido al biodigestor flexible de bolsa erróneamente.

Imagen 29. Fotografías de diferentes tipos de biodigestores. a) biodigestor mesofílico de mezcla completa de dos fases (Alemania), b) Biodigestor de contacto para aguas de la industria de la palma aceitera en Costa Rica, c) biodigestor UASB tratando aguas mieles de la industria del café en Costa Rica, d) biodigestor de laguna cubierta de 900 m^3 en una granja de cerdos en Costa Rica, e) biodigestor domestico de domo fijo nicaragüense, en Nicaragua, f) icónico biodigestor flexible, popularmente conocido como bolsa con la adición de reservorios flotantes en la Universidad EARTH en Costa Rica.

Fuente: (Viquez J. , 2009-2018)

6. Dimensionamiento de biodigestores

El dimensionamiento de un biodigestor es un tema bastante amplio, pues no se reduce únicamente a encontrar o calcular el tamaño del biodigestor necesario, pero al contrario involucra una mezcla de variables vistas a lo largo de esta guía como lo son los diferentes sustratos, requerimientos de pretratamiento, la gran gama de biodigestores disponibles y los usos del biogás. La Imagen 30 muestra los diferentes segmentos que deben ser considerados para el diseño de un proyecto de biodigestión. Sin embargo, se hará un enfoque en el dimensionamiento para escoger el volumen adecuado de un biodigestor y las variables involucradas.

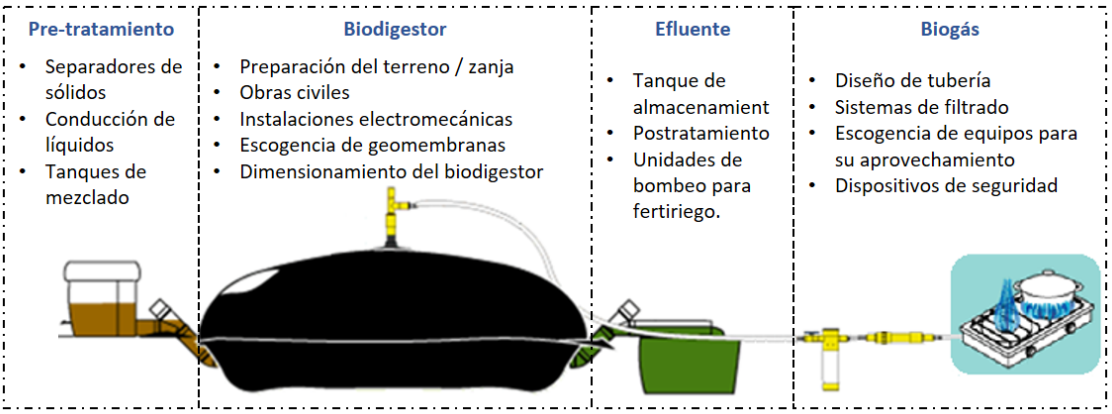


Imagen 30. Secciones que considerar en el diseño de un biodigestor.

Fuente: Elaboración propia, usando el modelo de (Buen manejo del campo; Sistema Biobolsa, 2018)

Esencialmente, como fue mencionado en el capítulo anterior, los fundamentos de la digestión anaerobia deben ser respetados para un correcto dimensionamiento. El tiempo de retención hidráulico, por ejemplo, no puede ser inferior a 20 días para biodigestores incapaces de retener biomasa, o la VCO no puede exceder la capacidad por el cual el biodigestor está diseñado, o habrá problemas de acidificación. Los siguientes pasos pueden servir de guía para dimensionar un biodigestor:

1. Determine con claridad y certeza la carga orgánica seca (o sólidos volátiles) del proyecto en cuestión.

Ecuación 8. Fórmula para calcular carga orgánica (CO).

$$CO = Q \cdot S^0$$

Fuente: Elaboración propia

Donde:

Q: es el caudal de alimentación diaria expresada como m^3/d,

S^0 es la concentración de materia orgánica, expresado en kg/m^3 (de DQO o SV).

2. Escoja adecuadamente, según el tipo de sustrato y la escala del proyecto, el tipo de biodigestor que mejor le convenga de la Imagen 28. Determine la VCO y el TRH mínimo en el cual ese biodigestor, bajo las condiciones de operación (principalmente temperatura), puede operar exitosamente.

3. Realice la estimación del volumen del biodigestor requerido, basado en la velocidad de carga orgánica.

Ecuación 9. Fórmula para calcular el volumen del biodigestor basado en la VCO.

$$V = \frac{CO}{VCO}$$

Fuente: Elaboración propia

Donde:

CO: es la carga orgánica expresada como kg SV (o DQO)/d,

VCO: es la velocidad de carga orgánica determinada para el biodigestor, expresado en kg (de DQO o SV)/m³.d.

Verifique el tiempo de retención hidráulico (Ecuación 10), resultante del cálculo del volumen del biodigestor no sea inferior el mínimo; en caso de serlo, debe recalcular el volumen usando el TRH (Ecuación 11).

Ecuación 10. Fórmula para calcular el TRH del biodigestor basado en el volumen del biodigestor.

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Fuente: Elaboración propia

Donde:

V: es el volumen liquido del biodigestor, expresado en m³, y

Q: es el caudal de alimentación diaria expresada como m³/d.

Ecuación 11. Fórmula para calcular el volumen del biodigestor basado en el TRH.

$$V = TRH \cdot Q$$

Donde:

V: es el volumen liquido del biodigestor, expresado en m³,

y Q: es el caudal de alimentación diaria expresada como m³/d.

Fuente: Elaboración propia

Con los pasos anteriores, y luego de varios cálculos de práctica, notará que existe una correlación indirecta entre el VCO y el TRH. Entre mayor sea la VCO utilizada, menor será el volumen del biodigestor y menor será el TRH. De la misma forma, entre mayor sea el TRH, más grande será el biodigestor, y menor será el VCO.

Esto es importante, pues el contenido de humedad (o materia seca) determina que tan concentrado o diluido este el sustrato. Con sustratos diluidos aprenderá que para lograr operar un reactor con un VCO alto (o sea un biodigestor pequeño), se logrará únicamente con un TRH bajo, por lo que deberá implementar estrategias para la fijación de la biomasa.

7. Referencias

Al Seadi, T. R. (2008). *Biogas Handbook.* University of Southern Denmark Esbjerg. ISBN 978-87-992962-0-0.

Bond, T. &. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable development*, 15(4), 347-354.

Buen Manejo del Campo (Sistema Biobolsa). (2018). *Manual de instalación.* Mexico.

Buen manejo del campo; Sistema BioBolsa. (05 de Febrero de 2018). Obtenido de http://sistemabiobolsa.com/

Buswell, A. M. (1952). Mechanism of methane fermentation. . *Industrial & Engineering Chemistry,*, 44(3), 550-552.

Davis, C. H. (January de 1983). A combined digester and gasholder PVC plastic tube biogas unit. *ADAB news*, págs. 35-41.

Demuynck, M. &. (1984). *Biogas plants in Europe.* International journal of solar energy, 2(6), 477-485.

Fulford, D. (1996). *Biogas stove design.* Kingdom Bioenergy Ltd.

Fulford, D. (2015). *Small-scale Rural Biogas Programmes: A Handbook.* Practical Action Publishing.

Garfí, M. M.-H. (2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 599-614.

Hivos. (2015). *Usos y beneficos del biol y biogás.* La Paz: Oficina regional de Hivos Sud America.

Lossie U., P. P. (2008). *Control orientado de plantas de biogás con la ayuda de FOS/TAC.* HACH.

Martí Herrero J., P. D. (2017). *Guía para el diseño, construcción, operación, mantenimiento, seguimiento y control de plantas de biogás de pequeña y mediana escala enfocadas al sector lechero en Chile.* Santiago: ONUDI.

Marti Herrero, J. (2017). Aprovechamient solar para aumentar Temperatura y resultados de produccion de biogas a diferentes temperaturas. . *IX ENcuentro RedBioLAC.* Buenos Aires: RedBioLAC.

Martí Herrero, J. P. (2016). *Oportunidades para el desarrollo de un sector sostenible de biogestores de pequeña y mediana escala en LACRed de biogestores para Latinoamérica y el Caribe. .* RedBioLAC (No. P06 17). RedBioLAC.

Patiño, F. C. (2017). Adaptación y metodología para evaluar la conversión a biogás de motores de combustión interna: Resultados Preliminares. *IX Encuentro de la RedBioLAC.* Buenos Aires: RedBioLAC.

Reith, J. H. (2003). *Bio-methane and bio-hydrogen: status and perspectives of biological methane and hydrogen production. .* Dutch Biological Hydrogen Foundation.

Rittmann, B. E. (2012). *Environmental biotechnology: principles and applications.* Tata McGraw-Hill Education.

Ross, C. C. (1996). *The handbook of biogas utilization.* Environmental Treatment Systems Incorporated.

Schmack, D. N. (2004). Biogas in fuel cells ready for production in five years? . *Renewable Energies*, Issue 6/2004.

Speece, R. E. (2008). *Anaerobic biotechnology and odor/corrosion control for municipalities and industries.* Archae Press. (No. 628.3 S742a). .

Standard, V. D. I. (2006). *Fermentation of organic materials. Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests.*

Van Buren, A. &. (1979). *Chinese biogas manual.*

Van Lier, J. (n.d.). CIE4485. Wastewater Treatment - Anaerobic Treatment Fundamentals COD Balance. Technical university of Delft, Netherlands.

Viquez, J. (2009-2018). Biblioteca fotografica del autor. . Costa Rica.

Viquez, J. (2016). *Informe de validacion de 4 equipos a biogás.* Managua: SNV Nicaragua.

Viquez, J. (2017). *Informe de validaciones de 10 aplicaciones de biogás.* Managua: SNV Nicaragua.

Von Mitzlaff, K. (1988). *Engines for biogas. German Appropriate Technology Exchange (GATE), .* Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).

Walsh, J. L. (1988). *Biogas utilization handbook. .* Georgia, USA: Georgia Tech Research Institute.

Wellinger, A. M. (2013). *The biogas handbook: science, production and applications.* Elsevier.

8. Anexos

Anexo 1. Ejemplo de la estimación de lodo primario con composición molecular de $C_{10}H_{19}O_3N$ (Rittmann, 2012) a metano, según la fórmula de (Buswell, 1952).

Composición molecular: $C_{10}H_{19}O_3N$

Según (Buswell, 1952):

$$C_aH_bO_c + \left(a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right)H_2O \rightarrow \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4}\right)CH_4 + \left(\frac{a}{2} - \frac{b}{8} + \frac{c}{4}\right)CO_2$$

Por tanto:

a/2 + b/8 – c/4 = moles CH_4

10/2 + 19/8 – 3/4 = 8,13 moles CH_4

En otras palabras, cada 1 mol de lodo primario ($C_{10}H_{19}O_3N$), con peso molecular de 201 g/mol, puede generar 8,13 moles de CH_4, el equivalente a 182,11 L CH_4 (@ 0°C de temperatura y 1013 HPa de presión, que corresponde a 22,4 L / mol).

La masa molecular, es considerada la masa orgánica, o sea 201 g MoS pueden generar 182,11 L de CH_4, lo cual equivale a (182,1 L CH_4 / 201 g MoS) **0,90 m^3 CH_4/kg SV**

Anexo 2. Ejemplo de cálculo de la estimación de la cantidad de biogás que puede generar una granja de 50 cerdos.

- Con datos en campos, o estimaciones educadas, se puede decir:
- Número de animales: 50
- Peso promedio de un cerdo en una granja de ciclo completo: 50 kg/animal
- Índice de excreción: 6% de su peso vivo (o sea un cerdo de 50 kg, excreta 3 kg / d)
- ST del estiércol de cerdo: 8%
- SV o MoS del estiércol de cerdo: 80%$_{bs}$
- Rendimiento de biogás del estiércol de cerdo: 0,25 m^3 biogás/kg SV

Por tanto,

50 animales x 50kg/animal x 0,06 x 8% ST x 80% SV x 0,25 m^3 biogás/kg SV = 2,4 m^3 de biogás diario.

Anexo 3. Ejemplo de cálculo de la estimación de la cantidad de biogás con el método del DQO.

Tomando como ejemplo las aguas residuales generadas en un hogar de 5 personas. Usando estimaciones educadas y valores de campo:

- Número de personas: 5

- Caudal de aguas residuales: 150 L/persona = 0,15 m^3/persona
- DQO del agua: 500 mg/L = 0,50 kg/m^3
- Eficiencia del digestor: 75%
- Concentración de metano en el biogás: 60%
- Rendimiento de metano: 0,35 m^3CH_4/kg $DQO_{.degradado}$

Entonces,

5 per. x 0,15 m^3/per. x 0,5 kg.DQO/m^3 x 75% x 0,35 m^3CH_4/kg DQO / 60% CH_4 = **0,16 m^3 biogás/d**

Anexo 4. Ejemplo del cálculo de la cantidad de material filtrante requerido para remoción del $H_2S_{(g)}$ en el biogás.

Usando estimaciones educadas y valores de campo:

- Cantidad de biogás a filtrar: 200 m^3/d
- Concentración de sulfuro de hidrogeno: 1500 ppm (vol/vol) o sea, 1 ppm de $H_2S_{(g)}$ significa 1 mL de $H_2S_{(g)}$ por 1 m^3 de biogás
- Vida útil del filtro: 6 meses (180 días)
- Sustrato por utilizar: Óxido de hierro
- Capacidad del sustrato: 90 g $H_2S_{(g)}$/kg sustrato
- Densidad del $H_2S_{(g)}$: 1,52 g/L

Por tanto:

200 m^3/d x 180 d x 1500 ppm x 1,52 g/L x 0,001 L/mL = 82 080 g $H_2S_{(g)}$ totales por filtrar

Si la capacidad del sustrato es que cada 1 kg remueve 90 g $H_2S_{(g)}$, por tanto, se requiere (82 080/90) = 912 kg de sustrato, que deben ser colocados en un filtro.

Importante, se debe asegurar que el tiempo de paso del gas por el filtro no sea menor al tiempo mínimo requerido para la reacción química.

Anexo 5. Cálculo de la combustión de biogás en aire. Estimación de la cantidad de aire por volumen de biogás para lograr una combustión completa.

Según (Fulford D. , 2015):

$$\underbrace{0{,}58\ CH_4 + 0{,}42\ CO_2}_{\text{Biogás}} + \underbrace{1{,}16O_2 + 4{,}36\ N_2}_{\text{Aire}} \rightarrow 1{,}0\ CO_2 + 1{,}16\ H_2O + 4{,}36\ N_2$$

Esto establece que por cada 0,58 mol de metano (12,99 L), equivalente a (compuesto por 60% de metano, o sea 12,99 L / 60%) 21,65 L de biogás, se requieren 1,16 moles de O_2 (25,99 L). Considerando que el aire está compuesto por 21% de O_2, entonces se requiere (25,99 / 21%) 123,8 L de aire, lo cual es equivalente a (123,8 L aire / 21,65 L biogás) a 5,7 L de aire por cada L de biogás.

Anexo 6. Estimación del consumo de biogás de un generador eléctrico siguiendo algunos supuestos.

Usando estimaciones educadas y valores de campo:

- Tamaño del generado: 150 kW
- Eficiencia del generador operando a plena carga: 28%
- Energía del biogás: 6,0 kWh/m^3 (asumiendo 60% de CH_4)

Por lo tanto,
El generador operando durante una hora genera: 150 kW x 1 hr = 150 kWh de energía eléctrica. Si esta energía fuese suministrada por biogás, a una eficiencia de 28%, el generador tuvo que haber consumido: 150 kWh/28% = 535,8 kWh de energía; y si el biogás tiene una energía específica de 6 kWh/m^3, entonces 535,8 kWh equivalen a (535,8 kWh / 6kWh/m^3 = **89,3 m^3 biogás/hr)**

Anexo 7. Ejemplos de cálculos relacionados al tiempo de retención hidráulica.

El tiempo de retención hidráulica, es sencillamente la relación entre el volumen liquido del reactor o biodigestor, y el caudal de entrada. Asumiendo, por ejemplo, un biodigestor con una capacidad liquida de 1 000 m^3 que es alimentado diariamente con estiércol más agua que suman un caudal de 35 m^3/d, entonces el tiempo de retención hidráulico es:

$$\frac{1\,000\ m^3}{35\ \frac{m^3}{día}} = 28{,}5\ días$$