



# CURSO OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE SISTEMAS DE BIODIGESTIÓN DE PEQUEÑA Y MEDIANA ESCALA

## UNIDAD III: BIODIGESTORES Y OPERACIÓN DE PLANTAS DE BIOGÁS

### COMPONENTES DE UN BIODIGESTOR

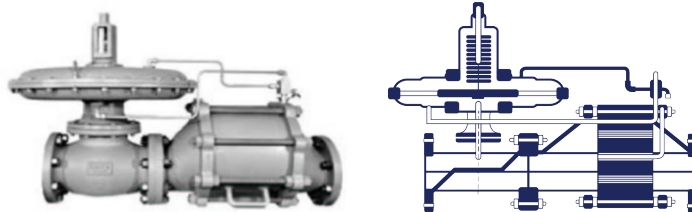
En este capítulo se detalla todo lo referente a los biodigestores. En primer lugar se nombrará y analizará brevemente cada componente que debe tener un biodigestor. Hay algunos elementos que son opcionales, y algunos que se utilizan dependiendo la escala de la planta de biodigestión. Los componentes son:

- ✓ **Reactor:** El reactor corresponde al dispositivo principal donde ocurre el proceso bioquímico de degradación de la materia orgánica. Los reactores de digestión pueden tener diferentes formas, como por ejemplo cilíndrica, cúbica, ovoide o rectangular. Los digestores modernos tienen cubiertas, fijas o flotantes, cuya misión es conservar la temperatura, evitar la entrada de oxígeno y recoger el gas producido.

Pueden estar contruidos de distintos materiales desde una piscina cubierta de polietileno de alta densidad, plástico, concreto hasta acero inoxidable. Dependiendo del diseño del reactor, éste podrá contar o no con un sistema de agitación, lo cual se detallará más adelante.

- ✓ **Cámara de entrada o de carga:** Es un dispositivo que facilita el proceso de alimentación o carga del biodigestor. Generalmente el afluente se coloca en el extremo superior del reactor; aunque también puede construirse una cámara pequeña donde se coloca lo que va a ingresar al biodigestor. También la carga puede almacenarse en tanques y luego bombearse o decantar hasta el reactor.
- ✓ **Salida del efluente:** En un digestor de cubierta fija puede haber uno o varios tubos de salida colocados a distintos niveles, para la extracción del efluente. Por regla general, se elige aquel nivel que extraiga un efluente de mejor calidad (con la menor cantidad posible de sólidos). Adicionalmente, puede haber en la parte más baja del biodigestor una salida para lodos, pero no es muy utilizado, ya que se barre gran parte de la carga bacteriana del mismo.
- ✓ **Salida y sistema de gas:** El sistema de gas lo traslada desde el biodigestor donde se produce hasta los quemadores o su uso final. Está compuesto de diferentes partes:

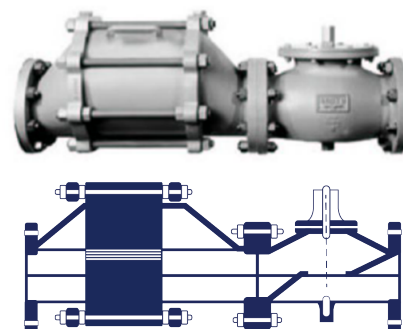
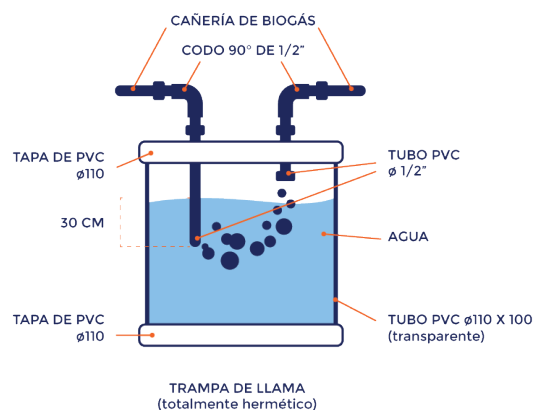
- **Almacenamiento de gas:** Habitualmente, la parte superior del digestor, llamada domo, cúpula o campana de gas se utiliza para almacenar el biogás que se genera. Esta campana de almacenamiento puede ser rígida o flotante. En algunos casos, está separada del digestor y se le llama gasógeno.
- **Válvulas de seguridad:** La válvula de seguridad tiene como finalidad evitar excesos de presión en el sistema, y consta de un plato cargado con arandelas de peso calibrado. La combinación de estos pesos junto con el peso del plato debe igualar la presión de gas de proyecto del tanque (normalmente entre 15 y 20 cm de columna de agua). Si la presión de gas en el tanque excede de este límite, la válvula se abrirá y dejará escapar gas durante un par de minutos.



- **Apagallamas:** Su función es evitar la propagación de llamas que se puedan generar accidentalmente. Debe ser acorde a la velocidad de llama versus velocidad del biogás en las tuberías. En la figura se esquematizan dos tipos, una industrial de fundición (derecha) y una artesanal (izquierda). En esta última se logra observar claramente el fundamento del funcionamiento de esta. La dirección de paso de gas es de izquierda a derecha, y el mismo burbujea en el agua para continuar su camino hacia el mechero.

En caso de que ocurra una falla en el mismo y se incendie el gas que está dentro de la cañería, la presión negativa o vacío hará subir el agua hasta que se selle la misma y la llama se apagará, evitando así su propagación hasta el gasógeno, generando una explosión. Otro tipo es el que se observa en la izquierda, que consiste en una caja rectangular que contiene aproximadamente de 50 a 100 placas de aluminio corrugado con agujeros taladrados.

Si se ocasionara alguna llama en la tubería del gas, se enfriaría por debajo del punto de ignición al pasar a través de los deflectores, pero el gas podría seguir pasando con poca pérdida de carga.





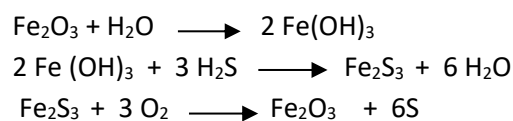
- **Condensador de agua o trampa de agua:** El gas del digestor está bastante húmedo, y en su recorrido desde el tanque caliente hasta zonas de temperatura más bajas el agua se condensa. Esta agua debe recogerse en los puntos bajos del sistema, ya que de lo contrario impedirá que el gas circule, causando daño en algunos equipos como los compresores, e interfiriendo en la posterior utilización del gas. Estos purgadores disponen generalmente de una capacidad de un cuarto o medio litro de agua. Como se observa en el esquema, consta de un recipiente lleno de agua con un orificio (a más de 30 cm de la base) para su drenado automático por rebalse. El gas circula por la tubería superior, y el agua que se condense fluirá por el caño que surge de la "T" hasta el interior del recipiente, ya que este sistema debe estar en el punto más bajo. El gas no sale porque la altura del caño supera la presión del mismo.



- **Filtro de ácido sulfhídrico:** Como se nombró en la unidad II, el producto de la biodigestión del azufre es el ácido sulfhídrico, el cual tiene olor similar a huevo podrido. Respirar o tener contacto con el H<sub>2</sub>S puede ser muy peligroso. La concentración máxima permitida de H<sub>2</sub>S para trabajar es de 10 ppm.

En concentración de 50 ppm, aproximadamente, se pierde el olfato y causa dolor de cabeza y mareo. En concentración de 100 ppm hace llorar, provoca estornudo y la pérdida del olfato, y puede ahogar si se tiene contacto con él durante una hora. Además, este gas es sumamente corrosivo, por lo que provoca grandes daños en las estructuras metálicas.

El H<sub>2</sub>S puede eliminarse por varios métodos. El más sencillo y económico consiste en eliminarlo por "absorción" con óxido de Hierro III mediante la siguiente reacción química:



El filtro se construye con un trozo de caño sellado que se pone en serie con el paso del gas. Dentro del mismo se coloca viruta de hierro o virulana de hierro oxidada, es decir, que ya esté de color rojo. Para oxidarla podemos dejarla al aire en presencia de agua unos días.



En caso de que la viruta que utilizemos sea residuo de algún proceso metalúrgico (lo cual recomendamos), puede ser que contenga grasas y aceites, lo que va a dificultar su funcionamiento. Podemos limpiarlas o activarlas de forma muy sencilla mediante un baño de ácido diluido (5%) y luego otro de hidróxido al 5%.



Otras formas de eliminar el  $H_2S$  es utilizando carbón activado, el cual es más costoso, pero funciona muy bien y se puede regenerar. También este gas puede eliminarse utilizando Tiobacterias, que son unos microorganismos aeróbicos que utilizan el  $H_2S$  como alimento, y lo oxidan a ácido sulfúrico, el cual se elimina como un líquido. Este último sistema es el más sofisticado (más complejo de instalar y mantener) y es muy utilizado a nivel industrial ya que es muy eficiente.

#### Opcionales:

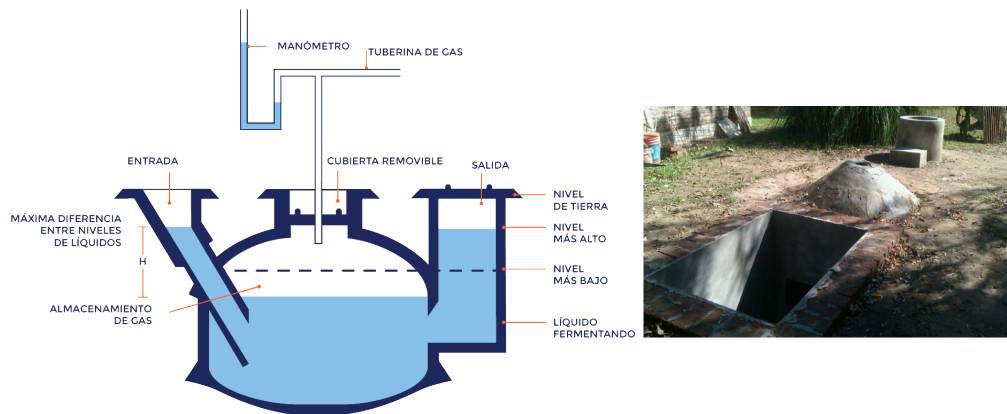
- ✓ Medidor/es de presión de gas (manómetro): Permite saber la presión del gas.
- ✓ Reguladores de presión: Permite mantener una presión constante en el sistema, y sólo permite el paso de gas al quemador por sobre una presión determinada.
- ✓ Quemador de los gases sobrantes: Se utiliza para quemar los gases que se generan en exceso en el sistema de digestión.

### DISEÑOS DE BIODIGESTORES

A continuación, se detallarán los diferentes diseños existentes de sistemas de biodigestión, sobre todo de los reactores. Se analizará cada uno evaluando sus fortalezas y debilidades, para tener así las herramientas para decidir qué diseño es conveniente utilizar.

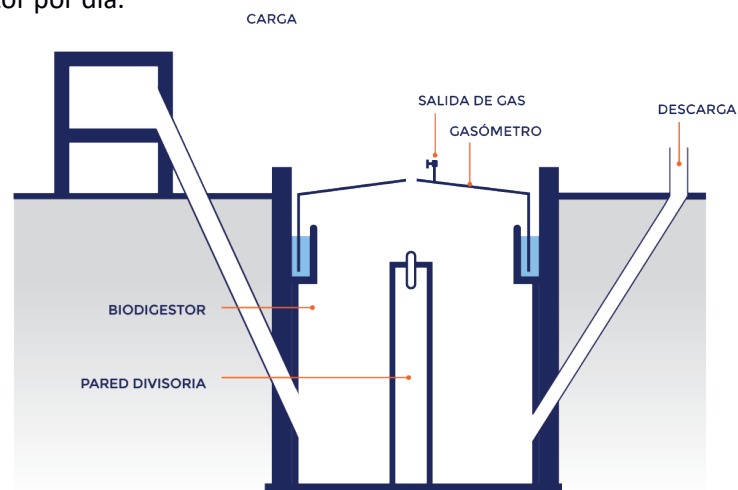
1. Digestor tipo chino: Es un biodigestor que trabaja de manera discontinua: Se carga una o dos veces al año (y se vacía) dando un excelente bioabono, ya que el tiempo de retención es muy largo. Este momento suele coincidir con la siembra de los cultivos, para aprovechar el fertilizante. El resto del tiempo se utiliza el gas que

produce sin agregar ni retirar ningún alimento al sistema. Este digestor está construido de material concreto (ladrillos y cemento) y tiene una cúpula fija donde se almacena el biogás que se va generando, alcanza presiones de hasta 100 cm de columna de agua. Estos digestores son poco eficientes ya que se generan 0.15 a 0.20 volúmenes de gas por volumen de biodigestor por día. Una desventaja de este sistema es que la presión del gas varía muchísimo en el tiempo y no se puede regular fácilmente, lo cual dificulta el funcionamiento de los artefactos (anafes).



2. Biodigestor tipo hindú: Son biodigestores continuos, es decir, que se cargan y descargan una vez al día, todos los días. Se los construye enterrados y verticales, semejando a un pozo. Se cargan por gravedad una vez al día. El gasómetro está integrado al sistema, de manera que en la parte superior del pozo flota una campana donde se almacena el gas. De esta forma, la presión del gas sobre la superficie es de alrededor de 30 cm de columna de agua.

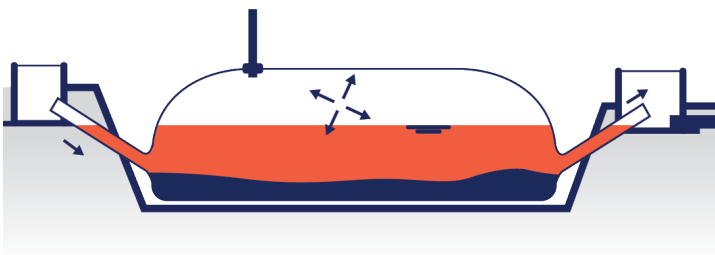
Con esta campana se logra, además, una presión constante, lo que permite una operación eficiente de los equipos a los que alimenta. Para aumentar la retención de la materia prima, posee un tabique central. En este caso, los materiales usados son preferentemente excretas, las que deben estar bien diluidas y mezcladas homogéneamente. Este tipo de digestor presenta una buena eficiencia de producción de biogás, generándose entre 0,5 y 1,0 volumen de gas por volumen de digestor por día.





3. **Biodigestor de diseño tubular:** Es un biodigestor de régimen continuo que consiste de un tubo de membrana ubicado en una pendiente, cuyos extremos están sellados a dos caños de PVC o integrados a las cámaras de carga y descarga. Se recomienda colocarlo enterrado dentro de un pozo que le ayude a mantener y sostener su forma. Los materiales recomendados para construirlo son la geomembrana de 1000 micrones o PVC. Algo muy importante es que las uniones con los caños de carga y descarga deben mantener el sello hidráulico, es decir, deben hacerse por debajo del nivel del líquido. Hay disponibles en el mercado soldadoras de geomembrana, para realizar uniones, parches y colocar la salida de gas. Este sistema tiene la ventaja de ser muy fácil y rápido de construir, y también los materiales que requiere son económicos.

Pero tiene algunas limitaciones, por ejemplo, un gran desafío es que no haya pérdidas de gas en las uniones. No se puede controlar fácilmente su temperatura y es necesario protegerlo de las inclemencias climáticas. Estos dos problemas se pueden solucionar construyendo un invernadero que lo proteja y mantenga su temperatura (ver figura). Pero la principal desventaja de este sistema es que no es posible mantener una presión constante de la salida del gas. Esto hace que los quemadores funcionen de manera intermitente, dificultando su uso. Puede solucionarse incorporando un gasómetro al cual se pueda aplicar un peso y así mantener la presión.



4. **Biodigestores “mixtos”:** Son biodigestores cuyo reactor está enterrado en el suelo, y se recubre el pozo (que puede ser de varias formas) con geomembrana. Luego se coloca una viga perimetral para darle estructura y se une mediante una planchuela (con tornillos y sellador) la cúpula o tapa del reactor, la cual suele ser de PVC. En esta misma cúpula se almacena el biogás. Este diseño puede escalarse fácilmente y



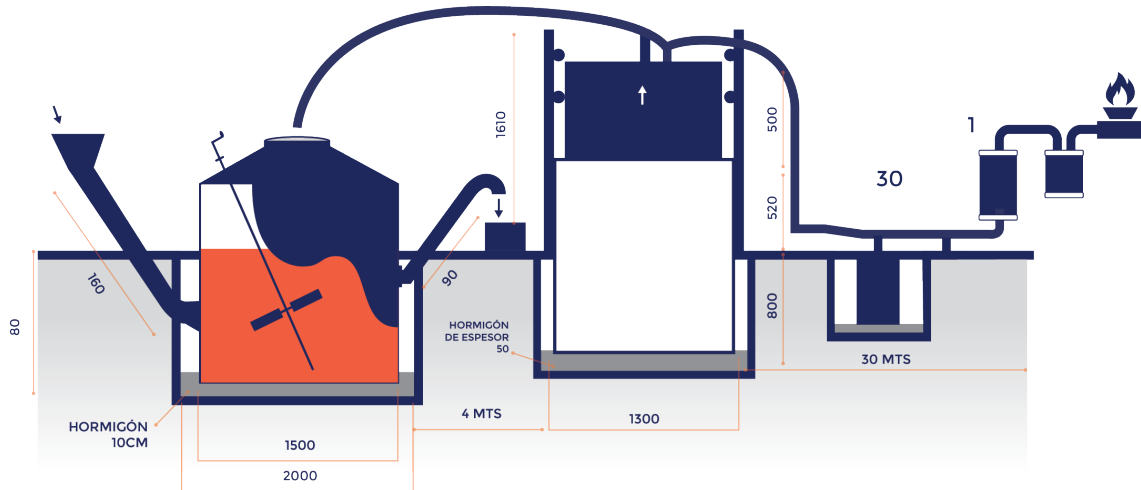
funciona bien en todas las escalas. Se suele agitar por burbujeo del biogás (ver más adelante).

Para obtener una presión constante de gas, se aplica un método que se presentará en otros diseños: La cúpula está formada por dos membranas, una sobre la otra, que cubren todo el perímetro del reactor. La membrana de abajo está en contacto con el contenido del reactor y es la que captura el Biogás. La membrana de arriba, en cambio, está conectada a un compresor de aire por una manguera externa y a un regulador de presión. Este compresor bombea aire automáticamente al espacio entre las dos membranas, de manera de mantener una presión determinada del biogás que está bajo la membrana inferior.

Esto tiene varios objetivos: por un lado, la membrana exterior está siempre inflada, lo cual protege todo el sistema del daño por vientos y tormentas; y lo más importante, mantiene una presión constante del biogás en el interior del biodigestor. Así, cuando se genera biogás y se infla la membrana inferior, el aire contenido en el espacio intermembrana es expulsado en igual cantidad, y esto mantiene la presión constante. Cuando se utiliza el biogás y se vacía la membrana interior, el compresor se enciende para bombear el aire necesario para compensar la disminución de la presión. Esto es fundamental para el correcto funcionamiento de los artefactos que utilizaran el biogás, sobre todo si se utiliza para generar electricidad.



5. Biodigestores realizados con tanques: Este tipo de biodigestores son de pequeña a mediana escala (familiar), y están contruidos con tanques prefabricados. La construcción se basa en un tanque (reactor), que puede ser de los prefabricados para contener agua, al cual se le coloca la carga, la descarga y la salida de gas. El gas generado en el reactor se acumula en gasógenos, que suelen ser de campana invertida. El gasógeno también se puede fabricar con bidones prefabricados, como los de 200 L, uno dentro del otro. Lo bueno de este diseño es que es económico y fácil de realizar. El reactor puede contar con un agitador manual. Como ejemplos, se muestra un diseño realizado por Ingenieros del INTA (1) y los biodigestores instalados como parte del programa educación energética, en todas las escuelas rurales de nuestra provincia.







A continuación, se presentan dos diseños de pequeña escala. Las dos primeras fotos son de un biodigestor cuyo reactor es un tanque recubierto de barro y paja. Este material permite lograr una muy buena aislación térmica. La carga está delante y la descarga por detrás (dos cubos verdes). El gasógeno está formado por dos tanques invertidos, uno flotando dentro del otro. Arriba se ven las piedras que permiten darle presión al sistema. La última foto corresponde a un diseño muy sencillo, es un biodigestor didáctico con fines educativos. Está formado por dos tanques invertidos, uno dentro del otro: el tanque de abajo es el reactor y el de arriba permite la captura del gas. Se observa la carga y la descarga, además de la salida de gas. Los dibujos en el mismo permiten comprender esquemáticamente lo que está sucediendo dentro del mismo.



6. Biodigestores industriales: Este tipo de biodigestores poseen volúmenes mayores a aproximadamente 5 m<sup>3</sup>. Generalmente se encuentran asociados al tratamiento de algún efluente o residuo generado en la producción, o que son consecuencia de las actividades humanas, por ejemplo, las plantas de tratamiento de efluentes cloacales. Estos reactores suelen tener diferentes diseños y conformaciones. Pero en general son reactores cilíndricos, con gasógenos de membrana incorporados (como los descritos en el punto 4) o acoplados. Suelen tener agitación mecánica. En la siguiente figura se ejemplifican algunos biodigestores industriales. En la figura del medio a la derecha se observa el regulador de presión y el compresor del gasógeno de doble membrana. La última foto es de un biodigestor de 50 m<sup>3</sup>, que



posee un gasógeno de membrana en la parte superior en forma de *donut*, que se utiliza para tratar residuos de leche en mal estado, ya que está en un tambo. El tanque de menor tamaño es un clarificador que utilizan para decantar los barros ricos en bacterias y las re-inoculan en el reactor principal.





## PARÁMETROS A TENER EN CUENTA AL MOMENTO DE DISEÑAR E INSTALAR UN DIGESTOR

Al haber evaluado la mayoría de los diseños existentes, se recapitulará y analizará qué es necesario tener en cuenta para diseñar un biodigestor y para su instalación. Existen tres factores principales que se deben evaluar al realizar la estimación económica de la implementación de esta tecnología:

- Recolección de las materias primas, transporte y acondicionamiento
- Almacenamiento del biogás, transporte y uso
- Almacenamiento del efluente, transporte y uso

### En cuanto al lugar

La elección del sitio donde se ubicará el digestor es de gran importancia pues incidirá en el éxito o fracaso de la operación del sistema. El lugar adecuado:

- a) Debe estar cerca del lugar donde se consumirá el gas, porque las presiones obtenibles dificultan el transporte a distancias mayores de 30 metros (dependiendo del digestor).
- b) Se debe encontrar cerca del lugar donde se genera el sustrato para evitar el acarreo que tarde o temprano atentará contra una operación correcta del biodigestor, e implicara mayores costos.
- c) Debe estar en un lugar cercano al de almacenamiento del efluente digerido y con una pendiente adecuada para facilitar el transporte y salida del mismo.
- d) Debe ubicarse preferentemente protegido de vientos fríos y donde se mantenga relativamente estable la temperatura, tratando de que reciba el máximo de energía solar (sobre todo en invierno).

Si el digestor es de material y está enterrado debe estar a por lo menos 10 – 15 metros de cualquier fuente de agua para evitar posibles contaminaciones.

### En cuanto al tipo de biodigestor

Esta decisión debe tomarse teniendo en cuenta algunos criterios tales como:

- a) La biomasa con que se cuenta para alimentar el digestor.
- b) El tamaño que tendrá el biodigestor.
- c) Energía que se quiere obtener.
- d) Inversión que se está dispuesto a realizar.
- e) Las características del lugar en cuanto a profundidad del nivel freático o mantos rocosos.

Veremos más adelante que en función de los dos primeros parámetros, podemos calcular el tamaño que deberá tener nuestro digestor. En función del tipo de residuo y el tamaño podremos elegir el diseño más apropiado, y también estimar la producción de biogás diaria, lo cual nos permitirá calcular el tamaño del gasógeno que necesitaremos.



### Recomendaciones para el diseño

- ✓ Se ha observado que la recirculación del efluente y para utilizarlo como inóculo aumenta el rendimiento de biogás sobre todo cuando el sustrato no es excremento (ya que este último contiene microorganismos).
- ✓ Es importante que el sustrato esté finamente dividido para aumentar la superficie de contacto para su asimilación por las bacterias. Se puede poner una trituradora en la entrada al digestor. Esto se recomienda sobre todo a gran escala, ya que en pequeña escala no genera diferencias significativas en la producción de biogás, y la trituradora implica un paso adicional que a la larga puede ser un problema para el operador.
- ✓ El mezclado del biodigestor en general mejora el proceso ya que más microorganismos acceden al alimento. Analizaremos este aspecto en detalle a continuación.

### AGITACIÓN - MEZCLADO

Los objetivos buscados con la agitación son:

- ✓ liberación del gas producido por las bacterias metanogénicas
- ✓ mezclado del sustrato fresco (alimento) con la población bacteriana
- ✓ evitar la formación de costra que se forma dentro del digestor
- ✓ uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica que reducirían el volumen efectivo del reactor
- ✓ prevenir la formación de espumas y la sedimentación en el reactor.

En la selección del sistema, frecuencia e intensidad de la agitación se debe considerar que el proceso anaeróbico involucra un equilibrio simbiótico entre varios tipos de bacterias. La ruptura de ese equilibrio en el cual el metabolito que produce un grupo específico servirá de alimento para el siguiente implicará una merma en la actividad biológica y por ende una reducción en la producción de biogás. Es por esto que la elección del tipo de agitación y el tiempo que dure la misma es de suma importancia.

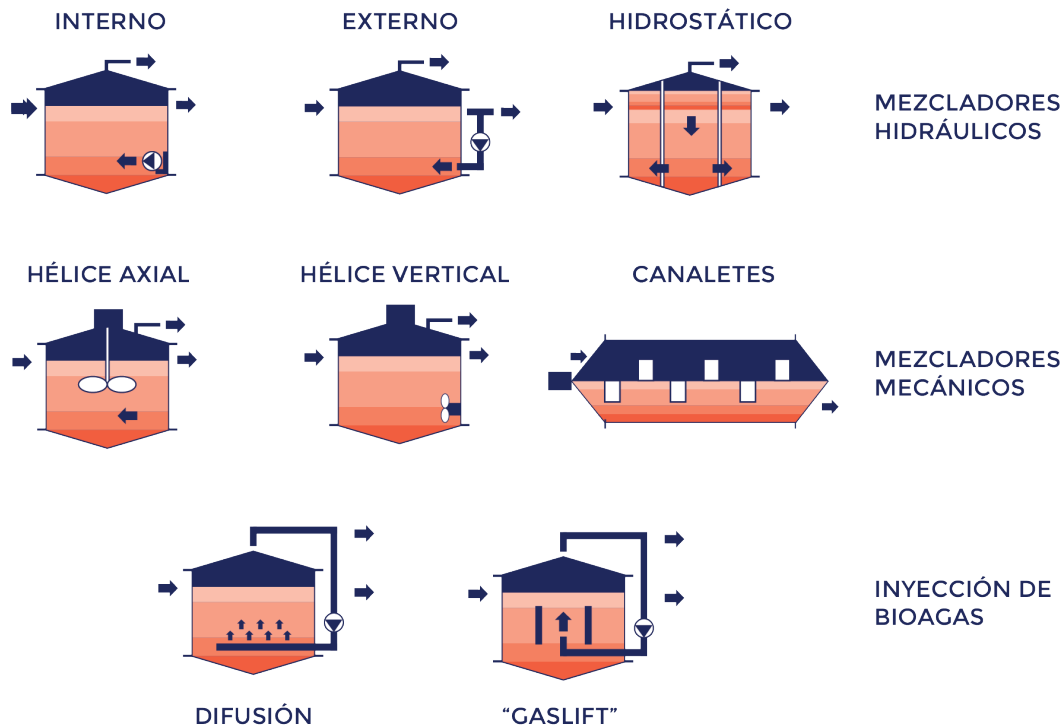
**Está demostrado que la agitación aumenta la producción de gas y disminuye el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH), porque:**

- Genera una distribución uniforme de la temperatura y sustrato en el interior del biodigestor.
- Genera una distribución uniforme de los productos, tanto intermedios como finales.
- Permite mayor contacto entre el sustrato y las bacterias, evitando la formación de cúmulos alrededor de las bacterias.
- Evitar la acumulación de lodo en la parte superior del digestor, también llamada “nata” o “espuma” que dificulta la salida del biogás.

Se distinguen 3 tipos de agitación, estas son:

- **Mecánica:** a través de agitadores manuales o con motores eléctricos.
- **Hidráulica:** a través de bombas de flujo lento con las que se hace recircular la biomasa.
- **Burbujeo de biogás:** se recircula el biogás producido hacia el fondo del biodigestor por medio de cañerías, para producir burbujeo y de esta manera movimiento de la biomasa

El siguiente esquema presenta los diferentes tipos de agitación:



En cuanto a la agitación mecánica, para sistemas de pequeña y mediana escala la agitación manual es la más económica y simple de colocar. Por regla general, se debe agitar de 2-5 minutos antes y después de cargar el digestor. Luego no se debe agitar nuevamente en todo el día. Esto es un dato empírico, pero está demostrado por la experiencia que aumentar la frecuencia de la agitación no conduce a mayor producción de biogás. De hecho, el movimiento de las paletas puede dañar las bacterias si se hace de manera muy fuerte. La desventaja de la agitación manual es que depende de alguien que se responsabilice de hacerlo a diario, sin vacaciones, y a veces sin fin de semana.

El diseño de los agitadores manuales varía mucho, tanto como la creatividad de los constructores lo permita. En las ediciones anteriores de este curso, el agitador que se construyó se realizó con caños de termofusión y placas de chapa. El problema de estos materiales es que los caños no tienen gran resistencia al esfuerzo y con el uso se traban. Por lo que recomiendo utilizar otro material. También tenemos el caso del exalumno Tarsicio Shaad, que diseñó su agitador colocando un caño de pvc dentro de la boca de carga con un plato en el extremo. Así, al mover el caño de arriba abajo, el plato agita el contenido. Este no ha mostrado problemas luego de un año de operación continua.

A continuación, se muestran fotos de los dos agitadores: De izquierda a derecha: Exterior de agitador de termofusión; Interior del agitador de termofusión y agitador de PVC dentro de la cámara de carga.

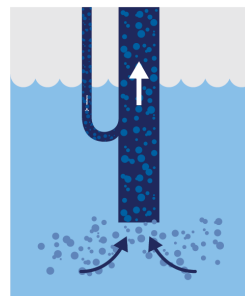


En el caso de reactores de tamaño industrial, la agitación debe hacerse mediante paletas movidas por motores. Si el digestor es termofílico, la agitación es fundamental para mantener la homogeneidad tanto de nutrientes como de temperatura, por lo tanto, se suelen agitar continuamente a baja velocidad. En la imagen se muestran ejemplos de agitadores en reactores de más de 2500 m<sup>3</sup>.



La agitación hidráulica se logra regulando la velocidad a la cual ingresa el líquido de carga al biodigestor, o recirculando el efluente de descarga.

La agitación neumática se puede realizar inyectando el biogás en la base del biodigestor, y así remover su contenido al subir. También se puede realizar mediante “gaslift”, método en el cual se inyecta gas en un caño o canal y al subir moviliza con él el líquido.





## OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE BIODIGESTORES

En esta sección se abordará todo lo referente a la operación de los biodigestores, incluyendo los cálculos correspondientes. La operación diaria de un biodigestor de mediana escala es muy sencilla y requiere muy poco tiempo. Pero la operación óptima necesita de un trabajo previo de cálculos y estimaciones que facilitarán luego este trabajo diario. Se detallará todo paso a paso y se demostrará que hay muchas formas de hacerlo.

Se comenzará por dos parámetros fundamentales para el funcionamiento global del digestor:

1. Tiempo de retención hidráulico (TRH): Se ha nombrado este parámetro anteriormente. Es el tiempo que permanece la materia orgánica dentro del reactor. Este tiempo depende del tamaño del biodigestor, de la temperatura y de la carga diaria del mismo:

$$\frac{\text{VOLUMEN DEL DIGESTOR (M}^3\text{)}}{\text{TIEMPO DE RETENCIÓN (DÁS)}} = \text{VOLUMEN DE CARGA DIARIA M}^3\text{/DÍA}$$

Como se puede deducir de la fórmula, mientras menor sea el tiempo de retención, el tamaño del digestor se reduce y también los costos. Para ejemplificar, la siguiente tabla presenta los principales valores de tiempo de retención según las temperaturas de trabajo (2):

TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRAÚLICO	CARACTERÍSTICAS
30 - 40 DÍAS	Clima tropical con regiones planas. Ej. Indonesia, Venezuela, América Central
40 - 60 DÍAS	Regiones cálidas con inviernos fríos cortos. Ej. India, Filipinas, Etiopía
60 - 90 DÍAS	Clima temperado con inviernos fríos. Ej. China, Corea, Turquía

Fuente: Verner, 1991

Este parámetro se encuentra directamente relacionado con la dilución de la corriente de entrada al reactor, pero no brinda información sobre el contenido de sólidos/material a degradar que tiene el efluente.



2. Velocidad de carga: Permite medir la cantidad de sólidos volátiles que se introducen al digestor, independientemente del volumen de carga. Con este parámetro se puede calcular cómo, por ejemplo, aumentar la carga manteniendo el volumen del reactor.

$$\text{VELOCIDAD DE CARGA} = \frac{\text{Kg SV}}{\text{m}^3 \text{ DIGESTOR.día}}$$

Para tener una noción de los valores de velocidad de carga, se presenta la siguiente tabla (3):



Los dos parámetros son complementarios, ya que brindan diferente información.

Entonces, si se desea calcular la carga del biodigestor ¿por dónde se comienza? ¡Por los parámetros fijos! Estos parámetros van a ser distintos según el caso, y puede ser la cantidad de residuo que se necesita tratar por día, o la cantidad de biogás que se requiere generar por día, o el tanque que se obtuvo para hacer el biodigestor... En fin, cualquiera sea el factor condicionante, se parte desde ahí. Vamos a tomar un ejemplo para explicar cómo haríamos un cálculo de carga:

Limitante: Volumen del digestor=  $1 \text{ m}^3$  (=1000 kg sabiendo que el 98% es agua)

Se desea construir un digestor que trabaje de manera mesofílica, por lo que el TRH es aproximadamente 33 días

Se puede calcular por la fórmula de tiempo de retención la masa que tengo que cargar diariamente:

Carga diaria = masa del reactor / TRH

Carga diaria=  $1000\text{kg}/33 \text{ días}$ = 30kg aprox

Esta carga diaria que se calcula corresponde al volumen (o masa) que se debe agregar al digestor todos los días, independientemente de la dilución del sustrato.





Por lo tanto, para saber la dilución, o cuanto sustrato se debe poner, debemos hacer el **balance de masa**:

$$M1.C1 = M2.C2$$

Siendo:

M1 = masa (kg) de sustrato

C1 = contenido de sólidos (%ST) del sustrato puro, sin agregado de agua (recordar que ST: Sólidos Totales)

M2 = masa total de la mezcla sustrato + agua (kg) (es decir, la carga diaria que se calculó antes)

C2 = contenido de sólidos (%ST) del sustrato con agregado de agua (que se propone que sea igual a 8%, puede oscilar entre 6 y 12% como se vio antes)

En este caso, suponemos que se quiere alimentar nuestro biodigestor con FORSU (fracción orgánica de residuos urbanos), por lo tanto:

$$C2 = 8\%$$

$$M2 = 30 \text{ kg}$$

$$C1_{\text{FORSU}} = 20\%$$

Para averiguar el valor de M1, la ecuación queda:

$$M1 = 30 \text{ kg} \cdot 8\% / 20\%$$

$$M1 = 12 \text{ kg Forsu}$$

Este valor M1 es la **cantidad de sustrato puro** que se coloca en los 30 kg de carga diaria que se calcularon al principio, es decir, M2. Por lo tanto, a partir de M1 y M2 (que ahora se conocen) se puede calcular la masa de agua a agregar para hacer la dilución correcta:

$$\text{Masa de agua agregada} = M2 - M1$$

Masa de agua agregada = 30 kg – 12 kg = 18 kg de agua (redondeando: 2 baldes de 10 litros).

**Si se posee más de un sustrato, la fórmula del balance de masa se modifica así:**

$$Ct.Mt = Ca.Ma + Cb.Mb + \dots$$

$$Mt = \sum Mi + \text{Magua agregada} = \text{masa mezcla final}$$

$$Ct = \%ST \text{ de la mezcla final}$$



Ca= %ST sustrato a

Ma= Masa sustrato a

Ahora sabiendo cuanta masa de sustrato se va a agregar, se puede calcular la **velocidad de carga**: Sabiendo que la alimentación diaria es de 12 kg de FORSU se debe calcular los sólidos totales que estamos agregando:

Según la tabla: FORSU tiene un 20% de ST, entonces:

100 g FORSU \_\_\_\_\_ 20 g de ST

1200g FORSU \_\_\_\_\_ x = 2400g ST

Si FORSU tiene 90,6 % SV (SV: sólidos volátiles), entonces:

100g ST FORSU \_\_\_\_\_ 90,6g de SV

2400gST FORSU \_\_\_\_\_ x=2174g de SV

Entonces, la velocidad de carga es: **Vcarga= 2,174 kgSV/m<sup>3</sup>.día**

Si observamos la tabla de más arriba, se comprueba que la velocidad está muy cerca de ser la correspondiente a un tanque mesofílico con agitación manual, lo cual podría ser el caso de este reactor de 1000L.

Por último, resta **calcular la cantidad de biogás que se generará por día**. En la unidad II se presentó una tabla con los valores estimados de generación de biogás por cada tipo de sustrato. En el caso de FORSU, por cada kg se generan aproximadamente 100L de biogás, entonces:

1Kg FORSU \_\_\_\_\_ 100L biogás

12Kg FORSU \_\_\_\_\_ x= 1200 L Biogás por día

Este ejemplo nos sirve para ver cómo se realizan los cálculos para la operación y, por qué no, diseño del biodigestor. En este caso se tomó como valor fijo el volumen del tanque con el que se contaba, pero podría ser la cantidad de biogás que se necesita generar, o la cantidad de residuo que se necesita tratar. Los cálculos son los mismos, sólo cambian los despejes de las fórmulas. Al final del capítulo se presentan ejercicios para practicar los cálculos, junto con un resumen de las tablas y fórmulas.

## OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR

A continuación, se describirán las acciones que debemos hacer para operar un biodigestor. Se detallarán en función de la frecuencia con que deben hacerse.

✓ **Diariamente**

Carga: Se prepara una mezcla del sustrato con agua formando un lodo, según los cálculos realizados previamente. Aquí se muestra un ejemplo de la carga de un reactor tipo tanque, en el cual debo colocar un balde a la salida del efluente. Luego, se agita 2 minutos (si es de agitación manual), se agrega el sustrato en la boca de carga, se mezcla otros dos minutos y se recoge el efluente.

Registro de la producción de biogás: para esto se recomienda observar y anotar la altura de la campana del gasómetro al comienzo y al final del día. Si se cuenta con otro método para cuantificar el gas, se puede utilizar. También se recomienda registrar la cantidad de bioabono que se genera.

**TODOS LOS DÍAS, AL MOMENTO DE ALIMENTAR AL BIODIGESTOR**

1. UBICAR BALDE BAJO LA DESCARGA



1. MOVER MEZCLADOR DURANTE 2 MINUTOS



3. ALIMENTAR POR BOCA DE CARGA



4. MOVER MEZCLADOR DURANTE 2 MINUTOS



5. RETIRAR EL DIGERIDO, GUARDAR EN LUGAR AIREADO

✓ **Periódicamente**

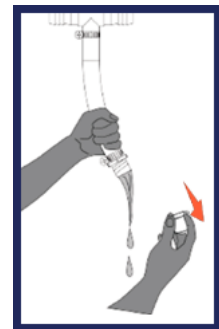
Revisión de la altura del agua en el gasómetro: Si se cuenta con un gasómetro de campana invertida, se debe controlar el nivel de agua dentro del mismo, para evitar pérdidas de gas. Esto se puede realizar una vez por semana.

Medición y registro del valor de pH o FOS/TAC: Es muy importante medir uno o ambos parámetros al menos una vez a la semana. Eso brinda valiosa información de lo que está ocurriendo en el interior del biodigestor. Más adelante se ampliará sobre estos parámetros.

Análisis de todos los datos registrados: Una vez por semana o, como máximo, cada 15 días, es importante revisar los datos que vamos registrando diariamente y analizarlos a conciencia, para poder descubrir modificaciones relevantes en los valores de los parámetros y así detectar de forma temprana algún inconveniente que hubiera con el funcionamiento del biodigestor. Principalmente se buscan variaciones importantes (más de 30-40%) en la producción de biogás o en el pH.

Verificación de acumulación de agua en líneas de gas:

Se recomienda hacer periódicamente inspecciones visuales a lo largo de las mangueras y dirigir cualquier acumulación hacia la trampa de agua. En el caso de que no tenga el nivel controlado mediante una perforación (como vimos en el modelo anterior), cuando el nivel de acumulación llegue al ~70% en las trampas de agua, drenarlas como se muestra en la figura. No olvidar cerrar la válvula de gas para que éste no se escape durante el vaciado.



Control del filtro de sulfhídrico: Si detectamos olor desagradable en el biogás, semejante al de huevo podrido, puede ser que se haya agotado la capacidad del material filtrante dentro del filtro de sulfhídrico, y sea necesario reemplazarlo por hierro oxidado nuevamente. La frecuencia de renovación del filtro va a depender de las características del biogás y de la cantidad que se produzca, pero oscila entre 2 a 6 meses. A continuación, se presenta una guía rápida de cómo cambiar el material del filtro.

**PASOS PARA CAMBIAR EL FILTRO:**

**COLOCARSE GUANTES Y LENTES PROTECTORES (EL LÍQUIDO Y POLVO QUE PUEDA HABER EN EL FILTRO ES NOCIVO PARA LA SALUD SI SE INGIERE O ENTRA EN CONTACTO CON LOS OJOS O HERIDAS EXPUESTAS EN LA PIEL).**



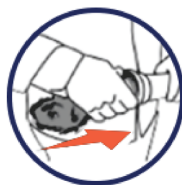
1. Cierra la válvula de paso que se encuentra entre la válvula de alivio y el filtro de biogás



2. Girando la tuerca-uniión, abrir el cartucho.



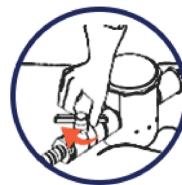
3. Retirar el material filtrante con cuidado y liberar el líquido excedente en el suelo o en una maceta.



4. Colocar dentro del cartucho material filtrante nuevo. Este puede ser cualquier tipo de hierro oxidado, como rebaba de tornos, fibra, tornillería, etc.



5. Cerrar el filtro asegurándolo y girando como se muestra en la imagen.



6. Ahora ya puede abrir la válvula de paso.



## PARÁMETROS PARA MONITOREAR EL FUNCIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR

Aunque todos los días se cargue el biodigestor y se verifique la producción de biogás, es necesario saber cómo está desarrollándose la biodigestión en el interior del reactor para poder prevenir a tiempo posibles interrupciones del proceso. Para esto se cuenta con algunos parámetros sencillos de medir que ayudan a “mirar por la ventana” y analizar lo que está ocurriendo. Los parámetros son:

- 1- Observación del funcionamiento en general: Se debe estar muy atento al momento de operar el biodigestor, principalmente para observar el rendimiento del biogás y el aspecto del bioabono. Cualquier cambio en la composición, cantidad o rendimiento de ambos puede ser una señal de que el digestor está funcionando mal. Para esto es esencial tener un **registro diario de la cantidad de gas** que se produce (altura del gasógeno) y **cantidad de efluente que obtenemos**.
- 2- Valor del pH: El pH puede variar con el tipo de sustrato y por alteraciones en el proceso de biodigestión. Se debe medir el pH del efluente del digestor, que será representativo del interior, y también se recomienda medir el pH del material de carga regularmente. En general, si:
  - El sustrato es rico en carbohidratos tenderá hacia la acidificación
  - EL sustrato es rico en proteínas tenderá a aumentar el pH por la producción de amonio.

El índice de alarma grave es cuando el pH es menor a 6,6; porque se interrumpirá la metanogénesis. Las bacterias metanogénicas son sumamente sensibles a las variaciones de pH en el digestor. Si el pH baja, se sigue generando biogás, pero poco metano, por lo cual baja el poder calorífico del biogás. Además, el metabolismo de las bacterias cambia generando cada vez más acidez, lo cual termina por detener el proceso de digestión.

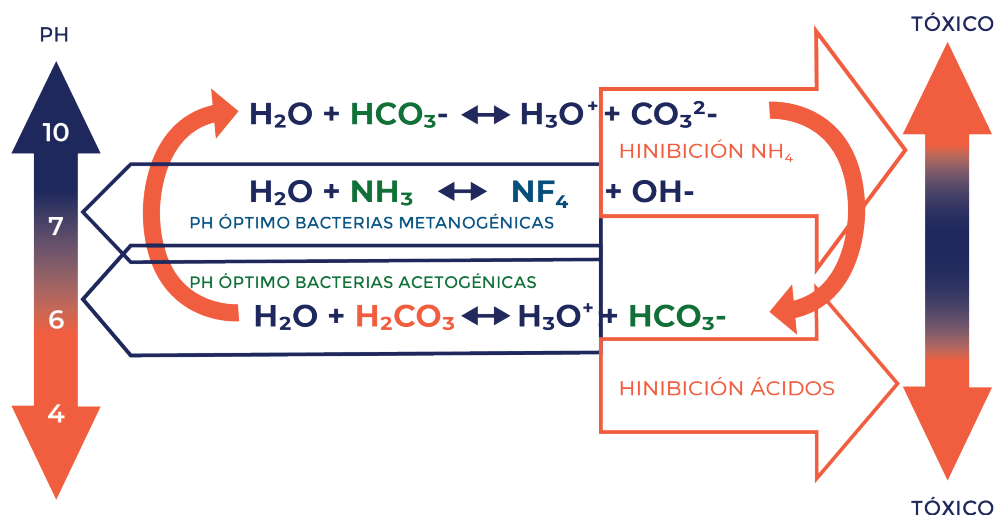
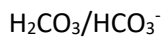
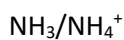
### ¿Qué se puede hacer para solucionar una baja en el pH?:

- ✓ Una de las primeras opciones para resolver el problema es reducir la cantidad de carga, hasta el punto en el cual los Ácidos grasos volátiles (AGV) se consuman más rápido de lo que se generan. Una vez que el exceso de AGV se ha agotado, el pH del sistema retorna a los rangos de operación normales y la metanogénesis comienza a repuntar. La carga puede incrementarse gradualmente a medida que el proceso se recupera, hasta completar la capacidad de carga óptima.
- ✓ En circunstancias extremas, además de la disminución de la carga orgánica volumétrica se puede suplementar algún químico para ajustar el pH como bicarbonato de sodio, carbonato de sodio, hidróxido de amonio, gas amoniac, cal, hidróxido de sodio y potasio. Se prefiere el bicarbonato de sodio debido a su alta solubilidad y baja toxicidad.
- ✓ Otra opción recientemente explorada consiste en la dosificación periódica de oxígeno en el sistema anaeróbico, que contribuye a eliminar drásticamente el exceso de AGV a través de los microorganismos facultativos.

- ✓ El nivel de pH deseado para la operación del digestor se puede conseguir ajustando el pH de las materias primas que entran al digestor y controlando el pH en el digestor por se.

Aunque el pH es un parámetro muy utilizado, no es un buen indicador, ya que su alteración sobreviene luego que se superaron los dos mecanismos de amortiguación que tiene el sistema: ¡Cuando cambió el pH, ya es tarde! ¡Debemos detectar el problema antes!

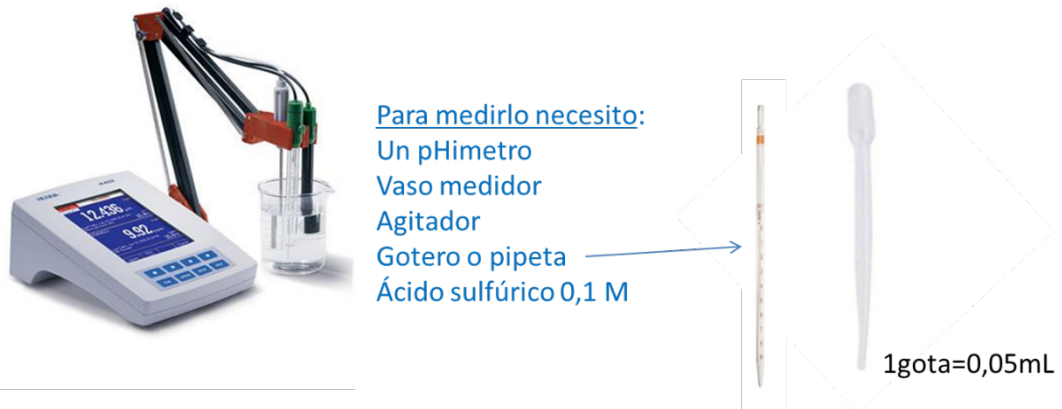
El digestor posee un sistema amortiguador de los cambios de pH compuesto por dos pares de buffers:



La presencia de estas especies le da al biodigestor la capacidad de autorregularse y amortiguar pequeños cambios que pueda haber en el pH. Como la concentración de estas especies es limitada, la capacidad reguladora de este amortiguador también lo es, por lo que, al haber grandes cantidades de un ácido o una base, excederá la capacidad del buffer y el equilibrio se perderá. Es en ese punto cuando ocurre un cambio significativo de pH, que se puede detectar al medirlo. En conclusión, cuando se observa un cambio en el pH, el sistema ya está fuera de equilibrio y es muy difícil recuperarlo. Es por esto que se necesita otra herramienta que permita medir la capacidad reguladora de este amortiguador natural del biodigestor, para poder anticipar la salida de régimen. Esta herramienta existe y se puede decir que es una medida del riesgo de acidificación del biodigestor. Esta herramienta se llama relación FOS/TAC.

- 3- Relación FOS/TAC: La relación entre los ácidos orgánicos volátiles y la capacidad de compensación alcalina es una medida del riesgo de acidificación de un biodigestor

(medida de la capacidad reguladora de pH del digestor) (4). Este parámetro fue desarrollado en Alemania, y se recomienda medirlo una vez por semana. FOS significa **Flüchtige Organische Säuren**, es decir, ácidos orgánicos volátiles y se mide en mg Ac. Acético/L. TAC significa **Totales Anorganisches Carbonat**, esto es, carbonato inorgánico total (capacidad de compensación alcalina), y se mide en mg  $\text{CaCO}_3$ /L. Para poder hacer la medición de este parámetro se necesita:



#### Realización de una medida de FOS/TAC

- 1) Tomar una muestra representativa del sustrato de fermentación.
- 2) Eliminar todo componente grueso de la muestra. Es crucial que la preparación de la muestra (filtro, colador de té, colador de cocina o centrífuga) se efectúe siempre de la misma manera.
- 3) Medir 20 ml de esa muestra.
- 4) Colocar la muestra sobre un agitador magnético y homogeneizarla continuamente durante el proceso de valoración.
- 5) Valoración con 0,1 N  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (ácido sulfúrico) hasta pH 5; anótese el volumen (ml) de ácido agregado. (TAC)
- 6) Valoración con 0,1 N  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (ácido sulfúrico) hasta pH 4,4; anótese el volumen (ml) de ácido agregado. (FOS)
- 7) Calcular el FOS/TAC mediante la fórmula empírica.

#### FÓRULA DE CÁLCULO (EMPÍRICA)

Especificaciones FAL

Cantidad de sustrato: 20ml

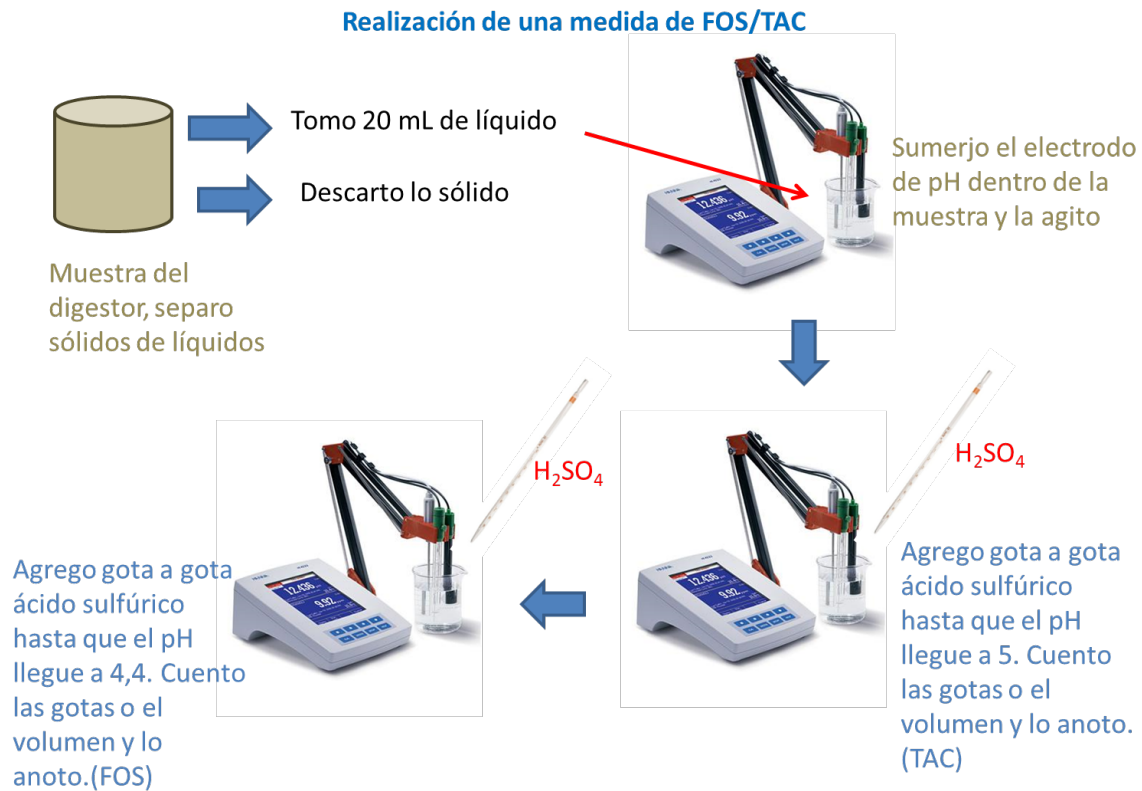
Ácido sulfúrico: 0,1 N (0,05 mol/l)

TAC = Volumen de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  añadido desde el principio hasta pH 5 en ml x 250

FOS = Volumen de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  añadido de pH 5 hasta pH 4,4 en ml x 1,66 - 0,15) x 500

**IMPORTANTE:** ¡Si la cantidad de sustrato o la concentración de ácido no son las arriba indicadas, debe modificarse la fórmula como corresponda!

Para verlo de forma más gráfica:



Una vez que se determina el valor de FOS/TAC, ¿qué información nos brinda? En la práctica, **una relación FOS/TAC de 0,3 a 0,4 es normal**, aunque cada biodigestor tiene su propio valor óptimo, el cual sólo puede determinarse mediante una observación a largo plazo (es decir, de sucesivas mediciones de FOS/TAC) y controles regulares, puesto que existe una fuerte dependencia del sustrato. Luego, se podrán observar variaciones respecto a este valor de referencia normal, lo cual se podrá interpretar de la siguiente manera:

- ✓ Si el FOS aumenta, significa que hay mucho acetato y las bacterias metanogénicas no lo están metabolizando lo suficientemente rápido, entonces se debe disminuir la carga.
- ✓ Si el valor de TAC da alto, significa que está subiendo el pH, entonces se debe aumentar la alimentación del biodigestor.

A continuación, se muestra una tabla con las posibles situaciones que se pueden presentar y propuestas de soluciones a aplicar





VALOR DE LA RELACIÓN FOS/TAC	ANTECEDENTES	MEDIDA
> 0,6	Excesiva sobrealimentación de biomasa	Interrumpir la adición de biomasa
0,5 - 0,6	Excesiva entrada de biomasa	Agregar menos biomasa
0,4 - 0,5	La planta está muy cargada	Vigilar la planta más estrechamente
0,3 - 0,4	La producción de biogás es máxima	Mantener constante la entrada de biomasa
0,2 - 0,3	La entrada de biomasa es muy baja	Aumentar lentamente la entrada de biomasa
<0,2	La entrada de biomasa es bajísima	Aumentar rápidamente la entrada de biomasa

### POSIBLES PROBLEMAS QUE SE PUEDEN PRESENTAR Y SOLUCIONES SUGERIDAS

Al momento de operar un biodigestor se pueden presentar numerosos problemas, muchos de los cuales ya se han trabajado y discutido. No obstante, se propone analizar la forma de resolver algunos posibles inconvenientes que se pueden presentar:

1- problema 1: no enciende el quemador.

Posibles causas y soluciones:

- ✓ La válvula de paso en el sistema de manejo de gas está cerrada
- ✓ Si hace poco se cargó, no hay biogás en el sistema, deberá esperar a que se produzca.
- ✓ Puede haber un tapón de agua en la línea de gas. Revisar toda la línea y drenar el agua.
- ✓ Puede haber una manguera doblada, revisar toda la línea y ajustar la manguera.
- ✓ Hay una fuga en el sistema. Revisar todo el sistema, especialmente las conexiones. Reparar la fuga.
- ✓ Hay poca presión en el sistema. Colocar un peso en el reactor o gasógeno para aumentar la presión.
- ✓ Puede haber una disminución en la cantidad de metano en el biogás: Alimentar con 1 taza de azúcar o 2 tazas de sorgo molido o maíz molido durante 1 semana, luego retomar la alimentación de diseño gradualmente, esto es: durante 3 semanas ir disminuyendo día a día la cantidad de azúcar o sorgo al tiempo que se aumenta la del sustrato final.

2- Problema 2: No hay gas en el reactor

Posibles causas y soluciones:

- ✓ Hay una fuga en el sistema, deberá detectarla y repararla.



- ✓ El nivel de agua en los tubos de entrada y salida en el reactor están por debajo del necesario, permitiendo la salida del gas. Deberá agregar agua para lograr los sellos de líquido.
- ✓ No hay suficiente biomasa en la mezcla, debemos aumentar la carga de alimentación.
- ✓ Ingresaron químicos en el agua o estiércol afectando a las bacterias y su producción de biogás. Deberá detectar el problema para no continuar agregando químicos y realizar una reactivación del sistema.
- ✓ Hubo sobrecarga de estiércol, generando indigestión y afectando la producción de biogás.

3- Problema 3: Disminución en la producción de gas y disminución en el valor del pH.

Posibles causas y soluciones:

- ✓ **Sobrealimentación:** Suspender la alimentación por al menos 1 semana, mientras se controla la producción de biogás y el pH, y se verifica que ambos aumenten. En caso de observar demasiado espeso el interior del biodigestor agregar agua y mezclar el biodigestor con el fin de diluir el material que se está biodegradando. Si al fin de la semana el pH retornó a 7, comenzar la alimentación gradualmente. Si el pH sigue bajo, hacer un recambio de  $\frac{1}{4}$  del volumen del biodigestor con inóculo nuevo (estiércol).

## PUESTA EN MARCHA DE BIODIGESTORES

Una vez que se diseñó y construyó el biodigestor, se debe poner en marcha. Hay varias formas de hacerlo, y la opción elegida se puede/debe adaptar al lugar y a la situación en particular. Principalmente consiste en 2 pasos: La inoculación y la aclimatación.

- ✓ **La inoculación:** es el agregado al biodigestor de un material que contenga comunidades de microorganismos anaeróbicos (inóculo). Los microorganismos presentes en el inóculo se “acostumbran o adaptan” a las condiciones de operación en un tiempo aproximado de 25 – 30 días. El agregado de microorganismos acelera el comienzo de la producción de biogás, ya que de otra manera demoraría 60 días o más. Se puede usar como inóculo:
  - *contenido de otro biodigestor* (idealmente que trabaje con el mismo sustrato con que lo hará el nuestro)
  - *estiércol de vaca*
  - *líquido de una zanja que presente burbujas* (extraer el material desde la mayor profundidad posible)
  - *estiércol de cerdo*
- ✓ **La aclimatación:** Es el proceso en el cual los microorganismos se adaptan a la alimentación del biodigestor, es decir, a degradar el sustrato elegido. Consiste en ir aumentando la cantidad de sustrato alimentado, hasta llegar al nivel de operación, de forma gradual. La mezcla de sustrato y agua que se agrega está en la proporción calculada para que la carga tenga alrededor de 6-8 % ST. Entonces se va a ir agregando cada vez más de la misma mezcla, sin cambiar su composición. Por ejemplo:



Si la alimentación de diseño es: 5 baldes de FORSU + 1 balde de agua

Calculo el 40%: 2 baldes de FORSU + 6 litros de agua

Se comienza alimentando el biodigestor con esa cantidad y se aumenta la alimentación cada 1 semana, incrementando en un 15-20 % cada vez.

La Puesta en Marcha abarca desde la inoculación hasta, luego de este aumento progresivo en las cantidades alimentadas, la operación del biodigestor durante al menos 3 semanas con las cantidades finales o “de operación”. Así se corrobora que en esas condiciones el sistema permanece estable. Puede prolongarse entre 30 y 60 días, dependiendo del inoculo, el sustrato elegido y la temperatura ambiente del momento.

Pero... ¿Qué sucede con la producción de biogás? En un comienzo debe salir el oxígeno contenido en el sistema, eso demora 7 días más o menos. Es conveniente dejar abierta la salida de gas esos días. Posteriormente cerrar y dejar que se eleve la presión interna y soltar el gas. Repetir esta operación por 10 – 15 días.

La producción del biogás comienza después de cierto periodo (Tiempo de Retención Hidráulica), en función del tipo de materias primas y de la temperatura interna de funcionamiento del biodigestor. Empíricamente, en la experiencia del biodigestor que se construyó dentro de este curso, se ha observado que si la temperatura es favorable la producción de biogás puede comenzar a los 10 días.

Transcurridos como mínimo 15 días de la carga inicial, se debe comenzar a verificar el inicio de producción de biogás mediante la “**quema de biogás**”. Se acopla una manguera a la salida de gas y utilizando un quemador o mechero, se prueba si el gas se enciende. Si el gas quema con una llama azulada y de buena consistencia, se puede iniciar el uso normal del biogás.

Se presentan dos ejemplos de puesta en marcha de biodigestores. Los cálculos para la carga se hacen utilizando las fórmulas y tablas que se mostraron previamente. Existen otros métodos de puesta en marcha que no serán expuestos en este apunte, por no contar con evidencia fehaciente de su funcionamiento.

1. *Puesta en marcha 1:* Se describirá la metodología utilizada para poner en marcha los biodigestores de escuelas rurales en la provincia de Santa Fe, dentro del programa Educación Energética (5). La puesta en marcha consiste en dividir el volumen del biodigestor a la mitad: llenar una mitad del volumen con inóculo y la otra mitad con la mezcla de alimentación, es decir, con el sustrato con que alimentaremos el digestor ya en la proporción de alimentación (6% ST). Como inóculo se recomienda utilizar estiércol de vaca o cerdo. Se tomarán como ejemplo para realizar los cálculos dichos biodigestores que tienen un volumen de 1000 L, y se supone que se alimentan con FORSU. Entonces, los pasos a seguir serían:
  - Preparar 500 litros de mezcla de alimentación con las cantidades necesarias para que tenga una concentración del 6% ST. Para esto, debemos calcularlo:



### M1.C1 = M2.C2

M1. 20%= 500 kg. 6%

$M1 = 500 \text{ kg} \cdot 6\% / 20\%$

M1= 150 kg de FORSU

Magua= M2-M1= 500kg – 150 kg= 350 kg agua

Entonces la mezcla a preparar de alimentación es de 150 kg de FORSU y 350 L de agua.

- Verificar el pH de la mezcla. En caso de ser  $pH < 6$  o  $pH > 8$ , corregirlo con el agregado de un ácido (puede ser vinagre) o una base (preferentemente, soda cáustica - Hidróxido de Sodio) en caso de ser necesario, para acercarlo a 7.
- Agregar el inóculo (y completar el volumen del biodigestor con agua o con el mismo inóculo, dependiendo del caso). Vamos a calcular cuánto inóculo debemos agregar:

### M1.C1 = M2.C2

M1. 18%= 500 kg. 6%

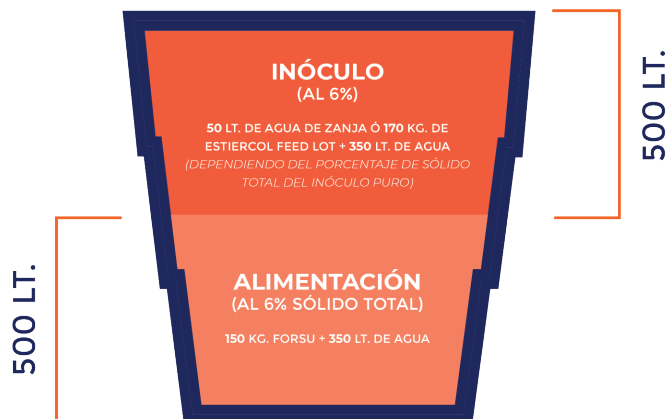
$M1 = 500 \text{ kg} \cdot 6\% / 18\%$

M1= 166 kg estiércol vacuno

Es decir, se debe agregar aproximadamente 170 kg de estiércol y 330 L de agua

- Mezclar bien y verificar que el valor del  $pH$  este cercano a 7.
- Dejar transcurrir entre 25 y 30 días verificando la generación de biogás y midiendo una vez a la semana el pH. En el transcurso de esos días, ventear a la atmósfera el contenido de los 2 primeros gasómetros que se llenen para eliminar todos los gases inútiles y el  $O_2$ . A partir de ese momento probar la quema de biogás.

En forma de esquema:



**NOTA:** tanto los sustratos como inóculos indicados, así como sus cantidades son sólo ejemplos. Las cantidades relativas se deberán calcular para cada caso con ayuda de las fórmulas 1 y 2 ya mencionadas. Se recomienda, sin embargo, mantener fijas las cantidades de 500 litros para cada parte (inóculo y alimentación).

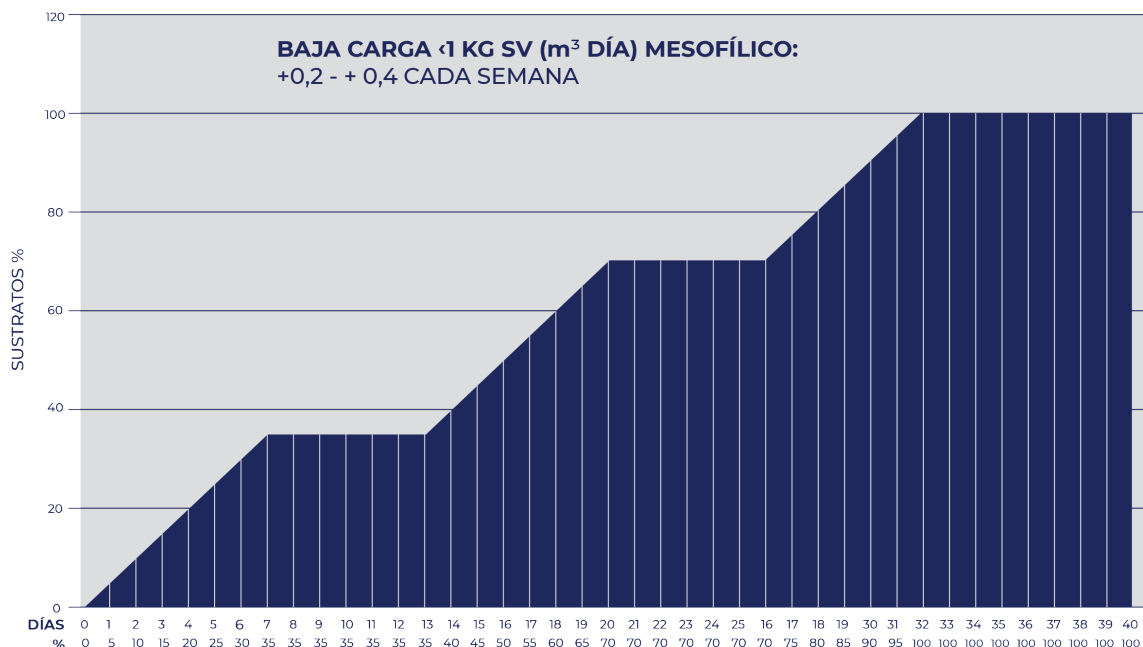
- Una vez cumplido con el tiempo de residencia de degradación de la materia orgánica se procede a realizar la alimentación continua del biodigestor de la siguiente manera:
  - Semana 1: 40% de la cantidad correspondiente de diseño.
  - Semana 2: 60% de la cantidad correspondiente de diseño.
  - Semana 3: 80% de la cantidad correspondiente de diseño.
  - Semana 4: 100% de la cantidad correspondiente de diseño.



A medida que se va aumentando la carga del biodigestor, a lo largo de las 4 semanas, verificar valores de  $pH$  para que los mismos se encuentren en 7.

Una vez finalizadas estas etapas, se inicia la “operación normal”.

2. *Puesta en marcha 2*: Este ejemplo de puesta en marcha es propuesto por Ingenieros del INTA (3), utilizando sólo estiércol como inóculo. Consiste en llenar el digestor con inóculo en una proporción del 8% de ST. Luego se adiciona un 10% de la cantidad final de sustrato que voy a utilizar y se aumenta esta proporción un 5% cada día hasta el séptimo día, es decir que tendremos una mezcla del 35% de sustrato final. Este porcentaje de alimentación debe mantenerse 1 semana para aclimatar las bacterias metanogénicas. Pasada esta fase de aclimatación incrementar en un 5% la mezcla de alimentación cada día hasta llegar al 70% y volvemos a conservar esta proporción de alimentación durante otra semana y luego agregar 5% cada día hasta completar el 100% de la mezcla de alimentación.



## PRODUCTOS: BIOGÁS Y BIOABONO

Los principales productos de la biodigestión son el biogás y el biofertilizante. Se analizarán sus usos y cómo proceder para aprovecharlos. Se comenzará con el biogás, enumerando sus posibles usos (entre otros):

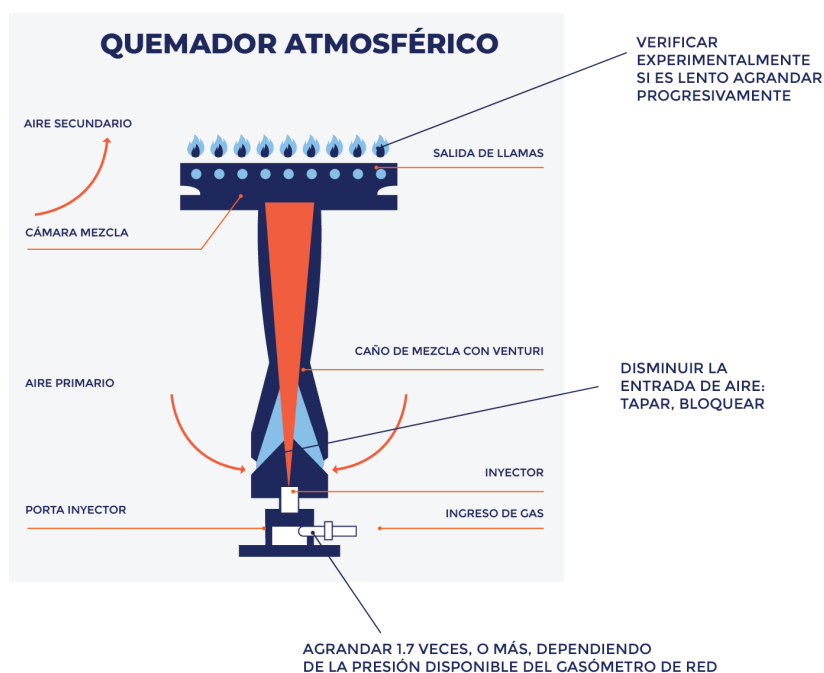
- 1) Quema directa para mitigar Cambio Climático
- 2) Cocción de alimentos
- 3) Calefacción de Ambientes
- 4) Calefacción en establecimientos de cría intensiva
- 5) Secado de granos
- 6) Iluminación en sectores de alimentación animal



- 7) Procesos industriales existentes (lácteas, cerveceras, dulces, alimentos en general) termotanques, calderas, etc.
- 8) Impulsión de biofertilizantes en suelos de cultivo
- 9) Refrigeración por absorción
- 10) Generación de Potencia Mecánica
- 11) Generación eléctrica en Red
- 12) Cogeneración (electricidad – Calor procesos)
- 13) Transporte Maquinaria agrícola
- 14) Transporte Automotor
- 15) Inyección de Biometano a Red de Gas Natural

En resumen, se puede utilizar como energía térmica (generación de calor o vapor), para generar electricidad o para combustible de vehículos. Existen también sistemas de cogeneración, donde se combina la generación de electricidad en un generador y el calor residual se usa también para calentar algún fluido, como el agua. Como se puede deducir, para cada una de estas aplicaciones tan diferentes, el biogás debe ser sometido a diferentes tratamientos previos.

En el caso de la **utilización como energía térmica**, la eficiencia de conversión es de aproximadamente el 80 %. Se recomienda la remoción del ácido sulfhídrico para evitar malos olores en caso de fugas. Igualmente, si alguna traza de este gas llega al quemador, también sufrirá la reacción de combustión transformándose en dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), que no tiene olor y no es tóxico. La utilización del biogás como energía térmica posee muy bajos costos de mantenimiento, y también de operación. Es necesario tener en cuenta que para que un quemador funcione con biogás, debemos adaptarlo levemente, como se muestra en la figura:



Existen numerosos equipos que aprovechan la energía térmica del biogás, como lámparas, heladeras, calefones y calentadores. Los consumos estimados de cada uno se muestran en la figura (6):

### Calentamiento e iluminación

Ver artículo Joaquín Viquez de estufas mejoradas segunda edición de la Revista RedBioLAC

Calentamiento de cerdos  
0,15 m<sup>3</sup>/h



Cocina  
0,45 m<sup>3</sup>/h por  
hornalla

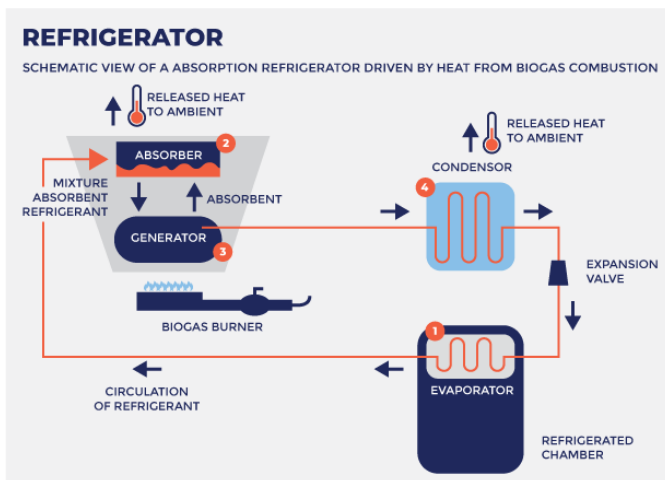


Quemador  
2 - 3 m<sup>3</sup>/h



Lámpara  
0,07 m<sup>3</sup>/h

Calentador instantáneo  
de agua 7L/min  
2 - 3 m<sup>3</sup>/h



Heladeras a  
biogás



Para **generar electricidad** a partir del biogás, debemos realizar un pretratamiento un poco más complejo, debido a que la combustión del gas ocurre dentro de un generador. Para esto lo más conveniente es realizar una purificación del biogás, la cual consiste en eliminar el agua y el H<sub>2</sub>S completamente. Esto se debe a que el agua y el ácido sulfhídrico causan corrosión en el motor.



La eficiencia de la conversión a electricidad no supera el 40%. Actualmente existen generadores fabricados para funcionar a biogás en el mercado, pero también pueden realizarse adaptaciones a motores que utilizan combustibles líquidos.



Generadores fabricados para funcionar a biogás  
3,0 kW – 2,1 m<sup>3</sup>/h

La tabla que mostramos a continuación (7) nos permitirá estimar, a partir del consumo, la cantidad de biogás que necesitamos generar para hacer funcionar estos equipos.

ENERGÍA	EQUIPO	CAPACIDAD INSTALADA	CONSUMO/HORA
Térmica	Tanque de agua	16 litros/min	1,5 m <sup>3</sup>
Térmica	Caldera	500 BHP	500 - 1 500 m <sup>3</sup>
Eléctrico	Generador biogás	75 kW	39 m <sup>3</sup>
Eléctrico	Generador biogás	250 kW	125 m <sup>3</sup>
Eléctrico	Generador biogás	1400 kW	900 m <sup>3</sup>

Por último, cuando se desea utilizar el biogás como **combustible para vehículos**, el biogás debe tener una calidad similar a la del gas natural, para usarse en vehículos que se han acondicionado para el funcionamiento gas. El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto a gasolina como diesel. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión; por otro lado, una desventaja es su baja velocidad de encendido. Sin embargo, se debe tener en cuenta que para permitir una autonomía razonable, el gas debe ser almacenado en contenedores cilíndricos de alta presión (200 a 300 bar); este tipo de almacenamiento implica que el mismo deba ser purificado antes de su compresión.

#### Purificación de biogás

Para obtener biogás de alta pureza y poder comprimirlo a fin de transportarlo es necesario eliminar el **CO<sub>2</sub>**, **H<sub>2</sub>S** y el **agua**. Se enumerarán a modo informativo algunas formas de eliminar





estos componentes. La elección de una tecnología para hacerlo dependerá de la calidad de gas que se busca obtener y del costo de la misma.

✓ **Eliminación de agua:**

El biogás puede secarse por compresión y/o enfriamiento del gas, adsorción en carbón activado o sílica gel, o absorción principalmente en soluciones de glicol y sales higroscópicas.

✓ **Eliminación del H<sub>2</sub>S:**

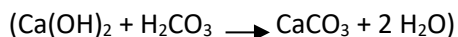
El carbón activado puede utilizarse para remover el H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub>. Este actúa como catalizador convirtiendo el H<sub>2</sub>S en azufre elemental (S). Otra forma de lavar el ácido sulfhídrico es usando soluciones de NaOH o viruta de hierro oxidada. Además, se pueden utilizar otros microorganismos como las tiobacterias, las cuales transforman el H<sub>2</sub>S a H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Por último, existe la opción de membranas que filtran este gas.

✓ **Eliminación del CO<sub>2</sub>**

Para eliminar el CO<sub>2</sub> se puede utilizar un lavado a presión contracorriente con agua. Para incrementar la remoción del CO<sub>2</sub> del biogás debe haber condiciones de alta presión, baja temperatura y pH alcalino.

Absorción en agua: El biogás comprimido a 10 – 12 bar es alimentado por la parte inferior de una columna. Mediante un flujo ascendente pasa a través del material de empaque y así transfiere el CO<sub>2</sub> al agua fría (5-25°C). El biogás sale por la parte superior de la columna con una concentración de metano mayor a 95%.

Mineralización: Se burbujea el gas en una solución de Ca(OH)<sub>2</sub> y el dióxido de carbono formará carbonato de calcio, el cual es insoluble y queda en el fondo del recipiente.



### Utilización del bioabono

El Bioabono o efluente líquido del biodigestor puede utilizarse como acondicionador o fertilizante (2):

**Acondicionador:** Tiene como principal papel la restitución al suelo de la materia orgánica estable, debido a los compuestos orgánicos presentes en el bioabono como la lignina, celulosa y hemicelulosa contribuyen a la formación de humus estable, previenen la erosión y aumentan la permeabilidad del suelo. A su vez constituyen también la base para el desarrollo de los microorganismos responsables de la conversión de los nutrientes en una forma que puede ser incorporada fácilmente por las plantas. El elevado contenido de amonio ayuda a evitar la pérdida de nitrógeno por lavado y lixiviación del suelo, así como las pérdidas por volatilización producidas por los procesos de desnitrificación biológica.

**Biofertilizante:** Se define por su aporte de elementos minerales, especialmente nitrógeno. Como subproducto después de la generación de biogás, se obtiene materia orgánica estabilizada rica en elementos minerales.

En función a la carga usada y el proceso seguido, este bioabono puede utilizarse de dos formas: líquida y sólida. En el primer caso se esparce directamente luego de salir del biodigestor. Para aplicarlo en forma sólida el efluente debe deshidratarse, generalmente se



hace en piletas de secado, donde el agua se evapora gracias a la acción del sol y el viento. Se debe tener en cuenta que la composición química (y de nutrientes) que tendrá el bioabono dependerá en gran medida del sustrato que se utilice y de las condiciones en las que se lleva a cabo la biodigestión. Si se desea saber la composición del mismo, se puede conocer mediante análisis químicos.

Algunos comentarios importantes sobre el manejo del bioabono (2): La aplicación del bioabono en períodos del año cuando existe una baja absorción de nutrientes de las plantas (e.g. otoño e invierno) puede resultar en la lixiviación y escorrentía de nutrientes hacia las aguas subterráneas y superficiales, respectivamente. Por lo tanto, el bioabono debe ser almacenado hasta la época adecuada de aplicación (primavera-verano). La extensión del período de almacenamiento requerido dependerá del área geográfica, tipo de suelo, precipitaciones y tipo de vegetación. Por ejemplo, en un clima templado se recomienda un período de almacenamiento del bioabono de 6 a 9 meses. Al igual que el guano, cuando el bioabono se almacena en tanques abiertos, se producen emisiones de gases amoníaco y metano. Estas emisiones se pueden reducir utilizando una capa que cubra la superficie.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Huerga I, Butti M, Venturelli L. (2014) Biodigestores de pequeña escala, un análisis práctico sobre su factibilidad. Ediciones INTA. ISBN 978-987-521-476-7.
2. María Teresa Varnero Moreno. Manual de Biogás FAO. Santiago de Chile, 2011. ISBN 978-95-306892-0.
3. Mariano Butti. Comunicación oral en encuentro REDBOLAC 2017. Operación y monitoreo de biodigestores. INTA Castelar.
4. Ulrich Lossie y Petra Pütz. Control orientado de plantas de biogás con la ayuda de FOS/TAC.
5. Manual de uso del biodigestor. Programa Educación Energética, 2018. Secretaría de Estado de la Energía.
6. Guillermo Zinola. Comunicación oral encuentro REDNIOLAC 2018. Estimación, manejo y aprovechamiento de biogás. NETUM – Uruguay.
7. Carolina Hernández Chanto: Comunicación oral en encuentro REDBIOLAC 2018. Instituto Costarricense de Electricidad. San José, Costa Rica.

## MATERIAL Y ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS

1. Se sugiere investigar una empresa que es pionera en el mundo en la producción y venta de biodigestores domiciliarios, y también de baños integrados a los biodigestores. <https://www.homebiogas.com/>



## EJERCITACIÓN

1. **Trabajo práctico: Proyecto personal de biodigestor.** Individualmente o en grupos pequeños (2 o 3) diseñar un biodigestor y hacer todos los cálculos pertinentes al tamaño, la carga, puesta en marcha, etc. De ser posible también averiguar costos de materiales (se puede hacer por mail). Compaginar toda la información en forma de proyecto, con dibujos del biodigestor proyectado.

### Biodigestores

2. Un digestor que cumple con las condiciones ideales de flujo pistón se carga diariamente con 75 litros. Si el volumen es de 4.5m<sup>3</sup> ¿cuál es el tiempo en que tarda, la carga, en recorrer todo el digestor hasta salir por el otro extremo?
3. Suponiendo que la carga diaria del digestor anterior es FORSU con un 8% de ST, y que los sólidos volátiles son del 90%. ¿Cuál es la velocidad de carga?
4. Calcula cómo sería la carga diaria de un biodigestor de tanque (370L útil) considerando un TRH de 30 días si se alimentara con distintos sustratos, informando la masa de residuo y volumen de agua a agregar. Luego calcula cuánto biogás producirá en cada caso.
  - a) FORSU
  - b) Estiércol de vaca
5. Dado un efluente pecuario, estiércol porcino, que se encuentra diluido a un 3% de ST. Cuanto sorgo granífero se puede adicionar por cada litro de efluente de manera de llegar a una mezcla de 8% de ST? Sorgo granífero: ST 96%, SV 98%.
6. Un biodigestor de 1000 L que está en una escuela se está cargando diariamente con 25 kg de FORSU, debido a que hay más desechos del comedor. Los operadores te consultan porque ven una disminución en la producción de biogás. ¿Cómo puedes diagnosticar el problema con estos datos? ¿Qué parámetro puedes calcular?
7. Un biodigestor se sale de régimen, dejando de producir biogás. Indica cómo procederías para diagnosticar el problema, y propone algunas causas posibles.

### PUESTA EN MARCHA

8. Se necesita realizar la puesta en marcha de un biodigestor mesofílico de 2m<sup>3</sup> que se alimentará con estiércol de cerdo proveniente de un feedlot. Elige la metodología a utilizar y realiza los cálculos para todo el proceso.
9. Calcula la puesta en marcha para un biodigestor que funcionará con FORSU. El mismo tiene 1,5 m<sup>3</sup> y trabaja a temperatura ambiente. Calcula también la carga diaria y cuánto biogás producirá una vez que esté en operación a máxima capacidad.

### ABASTECIMIENTO

10. Busca en la boleta de gas de tu hogar o empresa el consumo mensual de gas natural. Calcula, en base a las equivalencias que hay más abajo:



- a) ¿Qué cantidad de biogás se necesita para reemplazar el gas natural que consume?
- b) Piensa en la hipótesis de tener un biodigestor en el lugar donde se consume ese gas (hogar, fábrica, empresa, etc) y piensa con qué podrías alimentarlo. En función de ese sustrato y de la cantidad de biogás que necesitas generar, calcula el volumen que debería tener ese biodigestor, considerando régimen mesofílico.
- c) En base a los cálculos anteriores, y considerando que cada persona genera aproximadamente 250 g de FORSU por día, ¿Puedes autoabastecerte?
11. Realiza el ejercicio anterior basándote en el consumo eléctrico que figura en la factura de energía eléctrica.

Fórmulas y tablas:

Tiempo de retención:

$$\frac{\text{VOLUMEN DEL DIGESTOR (M}^3\text{)}}{\text{TIEMPO DE RETENCIÓN (DÁS)}} = \text{VOLUMEN DE CARGA DIARIA M}^3\text{/DÍA}$$

$$\text{VELOCIDAD DE CARGA} = \frac{\text{Kg SV}}{\text{m}^3 \text{ DIGESTOR.día}}$$

**Balance de masa: M1.C1 = M2.C2**

Siendo:

M1 = masa (kg) de sustrato

C1 = contenido de sólidos (%ST) del sustrato puro, sin agregado de agua

M2 = masa total de la mezcla sustrato + agua (kg)

C2 = contenido de sólidos (%ST) del sustrato con agregado de agua (que se propone que sea igual a 8%)

1 m3 de Biogás (60% CH4) = 1,71-2,2 kWh eléctrico

1 m3 biogás = 5500 Kcal

1m3 de GN= 9300 Kcal

kwh eléctrico obtenido ≈ 1 kWh térmico

1 kWh térmico = 860 kcal



RESIDUO	POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS (LITROS BIOGÁS/KG SÓLIDO FRESCO)
FORSU	100
Purín de cerdo	60
Estiércol vacuno	30
Desechos de huerta	50
Estiércol de aves	80
Estiércol caprino/ovino	50
Estiércol equino	40
Estiércol de conejo	60
Haces humanas	60

RESIDUO	%ST	%SV
Estiércol vacuno	18.20	83
Estiércol porcino	18	80
Estiércol aviar parrilleros	53	66
Estiércol aviar ponedoras	35	90
Desechos de huerta	11	94
Desechos con almidón o azucarados	18	94
FORSU	19,6	90,6
Sorgo granífero	96	98

RESIDUO	RELACIÓN C/N
FORSU	27:1
Purín de cerdo	16:1
Estiércol vacuno	25:1
Desechos de huerta	17:1
Estiércol de aves	23:1
Estiércol caprino/ovino	35:1
Estiércol equino	50:1
Estiércol de conejo	23:1
Haces humanas	3:1