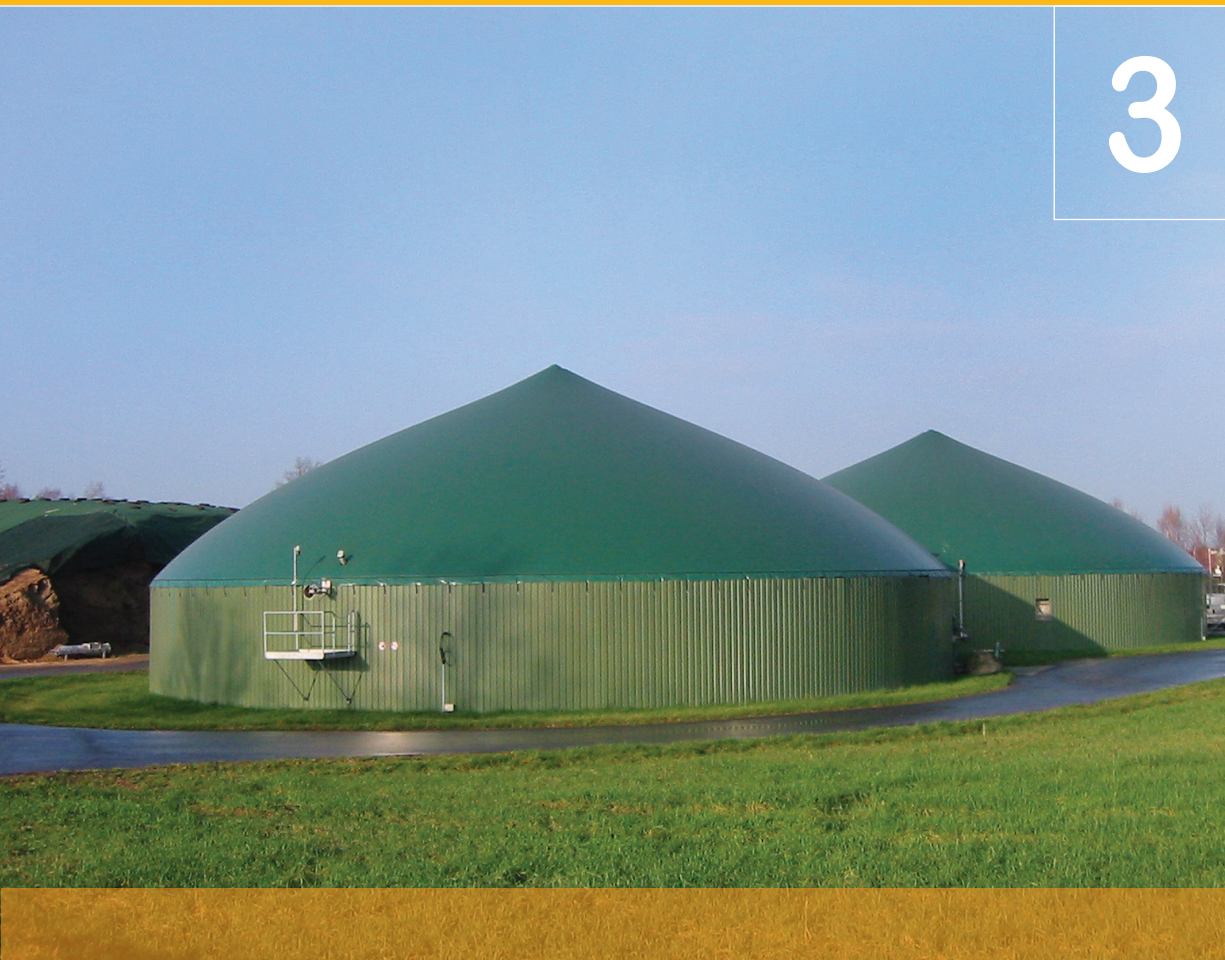


3



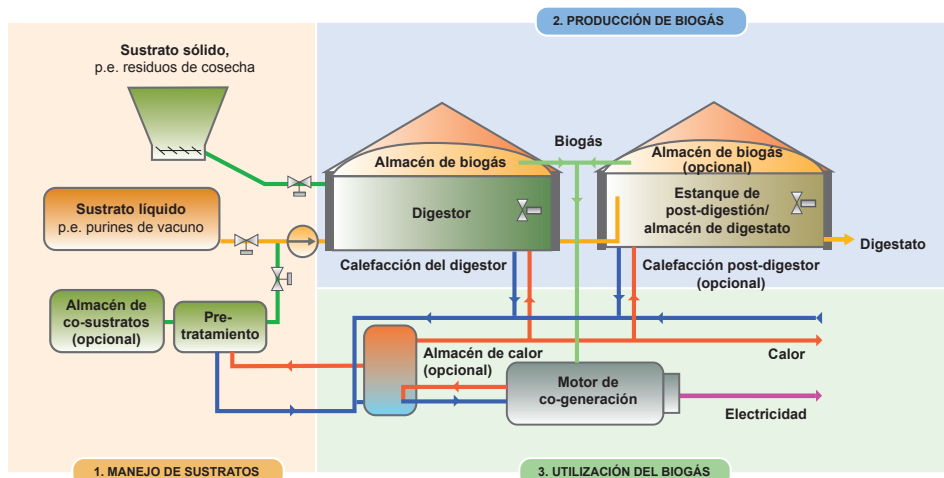
TECNOLOGÍAS EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

3. TECNOLOGÍAS EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

El presente capítulo entrega características generales de diversos tipos de tecnologías aplicables a cada etapa del proceso de una planta de biogás y sus campos de aplicación. Dependiendo del tipo de sustrato será necesario utilizar distintos componentes en la operación de la planta, lo que tiene influencia en su configuración final y en sus costos de inversión y operación. Por ejemplo, si se utiliza material fibroso deberá ser picado antes de su incorporación a los reactores para evitar posibles problemas mecánicos.

La Figura 8 entrega un esquema general de los componentes de una planta de biogás para generación de energía eléctrica y térmica, identificando las etapas principales del procesamiento de la biomasa: manejo de sustratos, producción de biogás y utilización del biogás. Estas etapas son discutidas en detalle en los puntos siguientes.

Figura 8: Esquema general de una planta de biogás para generación de energía eléctrica y térmica



Fuente: Elaboración propia

Figura 9: Planta de biogás



Fuente: FvB

3.1 Manejo de los sustratos

Para la recepción y manejo de los sustratos debe tenerse especial cuidado tanto en su consistencia como en su origen.

3.1.1 Recepción y almacenamiento

En el caso de sustratos con alto contenido de humedad, como algunos restos de frutas, pulpas vegetales, etc., la recepción y almacenamiento puede realizarse en fosos de recepción cerrados. La entrada de este tipo de residuos debe hacerse en camiones cerrados con descarga por manguera, la que es conectada al foso de recepción para realizar la transferencia. El foso debe contar con medidor de llenado y una bomba de vaciado para el transporte del sustrato hacia el digester. Para casos en que se utilice otro tipo de sustratos, como restos de frutas o vegetales con contenido de cáscaras y otros sólidos blandos de tamaño más grande, puede utilizarse una bomba con picador incorporado.

En el caso de purines agrícolas (vacunos o porcinos), por regla general, debe conectarse por medio de tuberías y bombas la zona de acopio de los purines en los sectores de crianza con la planta de biogás, dado que el transporte de purines en camiones cerrados es de elevado costo y requiere un alto esfuerzo logístico para plantas de escalas pequeñas (menor a 300 kW de potencia eléctrica instalada). Para plantas de mayor tamaño no se recomienda un traslado de purines sobre un radio de 30 km, ya que no se justifica el traslado del alto contenido de agua que contiene este tipo de sustrato.

Para la recepción de materia más sólida o fibrosa, como cultivos energéticos o desechos de vegetales, debe considerarse una zona de almacenamiento diferente a la zona de alimentación del digester. Para el almacenamiento de grandes cantidades de sustrato, como es el caso de cultivos energéticos o residuos estacionales, pueden utilizarse superficies grandes para ensilaje. Estos silos están compuestos por una superficie compactada. El sustrato se almacena en forma de silo (conservación ácido-láctica) y va siendo retirado paulatinamente para su alimentación en el digester.

Figura 10: Ejemplo de silo para cultivo energético



Fuente: UTEC GmbH

Para otro tipo de desechos vegetales fibrosos, cuya frecuencia de descarga esté más distribuida en el tiempo, puede utilizarse un patio de acopio con capacidad para uno a dos días de almacenamiento, de manera de que el sustrato no permanezca a la intemperie por tiempos prolongados.

Fundamentalmente el tipo de sistema a utilizar para el almacenaje de la biomasa debe cumplir con los siguientes requisitos:

- accesibilidad para carga y descarga;
- prevención de la descomposición (p.ej. largo tiempo de almacenamiento a pleno sol);
- minimización de olores;
- prevención a la lixiviación y contaminación de napas subterráneas.

3.1.2 Sistemas de alimentación

Los equipos utilizados para la alimentación de los sustratos al digestor dependerán de su consistencia y sus características. En caso de utilizar material sólido puede ser conveniente realizar una etapa de pretratamiento, consistente en el picado de la biomasa, a fin de asegurar un tamaño de fibra tal que no dificulte la homogenización ni el bombeo de la mezcla de sustratos.

Figura 11: Carga del contenedor dosificador de sustrato



Fuente: UTEC GmbH, planta de biogás 500 kW, sustrato maíz.

Figura 12: Contenedor dosificador de sustrato



Fuente: UTEC GmbH, planta de biogás 500 kW, sustrato maíz.

Para la alimentación de sustratos de bajo contenido de sólidos es apropiado el uso de bombas centrífugas. Para el transporte de material con contenido de sólidos a nivel medio se recomienda el uso de bombas peristálticas, muy utilizadas en tratamientos de riles agroindustriales. En ambos casos se utiliza frecuentemente un estanque de homogenización para los diferentes sustratos, desde el cual se bombean al interior del reactor.

Figura 13: Estanque de pre-mezcla con cargador frontal o sistema de flushing



Fuente: LfL

Para el transporte de sustratos con mayor contenido de sólidos también se pueden utilizar bombas de cavidad progresiva (tornillo excéntrico) o de pistón (embolo) giratorio. Éstas son ampliamente utilizadas en plantas de biogás en base a residuos sólidos agroindustriales y cultivos energéticos.

Para la alimentación del biodigestor con materiales sólidos (orujos, granos, ensilajes con tamaños de fibra grandes, etc.) conviene utilizar sistemas de tornillo sin fin. Una alternativa integrada consiste en un estanque de acero inoxidable con tornillo sin fin para transporte y picador incorporado. Puede utilizarse la alternativa de alimentación directa del digestor o aplicar un paso intermedio de mezcla con los sustratos más líquidos en un estanque de homogenización. Se recomienda el uso de acero inoxidable debido fundamentalmente al grado de acidez que se presenta en la descomposición primaria de los residuos. El uso de acero galvanizado sólo retrasa la corrosión en algunos años, y se deben cambiar con relativa frecuencia (dos a tres años) partes importantes del equipo.

Figura 14: Sistema de alimentación con estanque externo y cargador frontal



Fuente: FvB

Otro sistema utilizado, de mayor costo, consiste en un contenedor de hormigón con piso móvil y tornillos sin fin. En este caso, el material transportado por camiones tipo tolva es descargado directamente en el contenedor y es transportado desde ahí por tornillos sin fin para su posterior procesamiento y alimentación al digestor.

Figura 15: Sistema de alimentación con contenedor de piso móvil y tornillo sin fin



Fuente: LFL

3.2 Producción de biogás

La tecnología apropiada para la producción de biogás depende fuertemente del tipo de sustrato empleado, de sus condiciones, características y cantidad disponible. El reactor de digestión anaerobia es el componente central de toda planta de generación de biogás, para el cual existen diversos tipos y configuraciones posibles con sus sistemas auxiliares de calefacción, agitación del sustrato y almacenamiento del biogás producido.

3.2.1 Tipos de reactores de digestión anaerobia

Los diseños utilizados para digestión anaerobia pueden clasificarse en función de su capacidad para mantener altas concentraciones de microorganismos en el reactor, siguiendo diferentes métodos. Uno de los reactores más frecuentemente utilizados para residuos orgánicos de la agroindustria es el reactor de mezcla completa (RMC; *Continuous stirred tank reactor* CSTR en inglés).

3.2.1.1 Reactor de mezcla completa sin recirculación

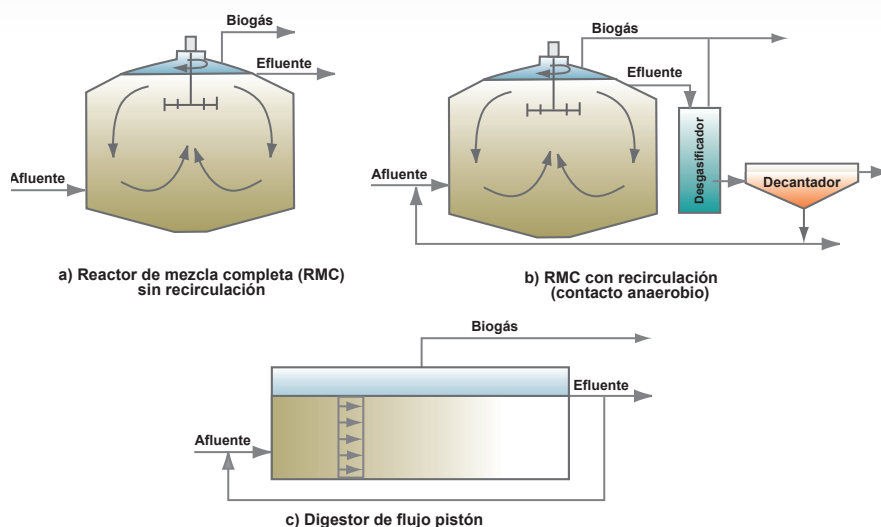
Se trata de estanques circulares herméticos, que pueden ser de acero u hormigón armado, en los que el sustrato es mezclado, de manera regular y no violenta, mediante agitadores. En estos reactores, los agitadores mantienen el régimen de mezcla completa, permitiendo que el sustrato que ingresa entre en contacto con la población bacteriana y con el sustrato en degradación. El sistema de agitación puede ser mecánico (agitador de hélice o palas, de eje vertical u horizontal) o neumático (recirculación de biogás a presión). Esta tipología de reactor no ofrece problemas de diseño (Figura 16a). Comparativamente a otros reactores, el tiempo de retención necesario es alto, debido a que la concentración de cualquier especie en régimen estacionario en el reactor debería ser la misma que en el efluente. Si la velocidad de reacción depende de la concentración, como es el caso de los procesos biológicos, la velocidad será baja, y la forma de compensarla es aumentando el tiempo de reacción.

3.2.1.2 Reactor de mezcla completa con recirculación

Este sistema tiene el nombre de reactor anaerobio de contacto y sería equivalente al sistema de lodos activos aerobios para el tratamiento de aguas residuales.

Se ha comprobado que, regulando la recirculación, es posible conseguir tiempos de retención hidráulica más bajos que en un reactor simple de mezcla completa. Esto es debido a que el tiempo de retención de los microorganismos aumenta, gracias a su confinamiento en el sistema mediante la separación en el decantador y recirculación (Figura 16b). Debido a la necesaria separación de microorganismos en el decantador, este sistema sólo es aplicable a aguas residuales de alta carga orgánica (aguas residuales de azucareras, cerveceras, etc.), para las que sea posible una separación de fases líquido-sólido, con la fracción sólida consistente básicamente en flóculos biológicos. Antes del decantador se debe disponer de un sistema de degasificación, sin el cual la decantación se puede ver impedida.

Figura 16: Esquema de reactores sin retención interior de biomasa



Fuente: Adaptado de IDAE

3.2.1.3 Reactor de flujo pistón

En este tipo de reactores se utiliza el empuje producido por la incorporación de nuevo sustrato para generar el flujo longitudinal del material (Figura 16c). La mezcla se produce generalmente en planos paralelos perpendiculares a la dirección de flujo a través de agitadores especiales construidos para ello.

Son apropiados para la digestión de sustratos con alto contenido de sólidos y pueden presentar un proceso microbiológico más estable. Su fundamento se basa en que las fases del proceso de digestión, si bien ocurren al interior del mismo estanque, se presentan a lo largo del flujo, concentrándose las primeras fases de hidrólisis y acidogénesis en las áreas de entrada de la biomasa, y las fases de acetogénesis y metanogénesis, en las secciones cercanas a la salida del flujo. Uno de sus inconvenientes es la falta de homogenización en la sección transversal a la dirección del flujo, en las configuraciones

horizontales, lo cual se puede evitar mediante un sistema de agitación transversal (por ejemplo, mediante la reintroducción de biogás a presión en la base del digestor si el reactor es horizontal).

3.2.1.4 Reactor con retención de biomasa, sin recirculación

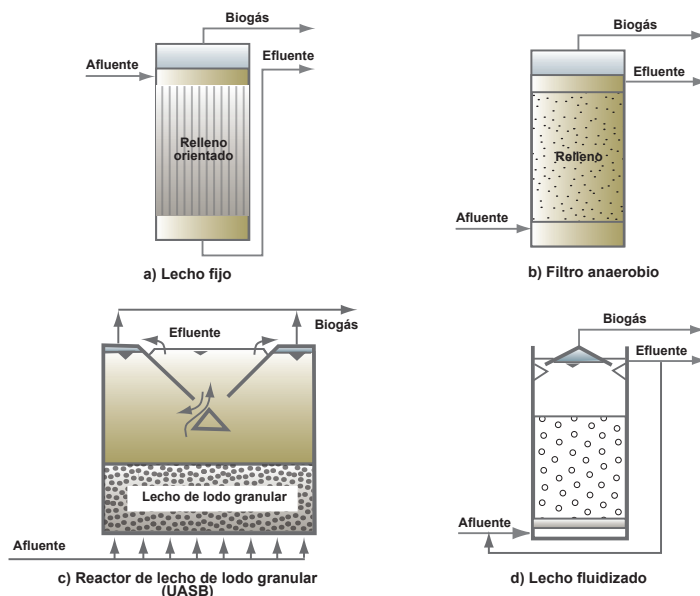
Si se consigue retener bacterias en el interior del reactor (Figura 17), evitando la configuración de reactor de mezcla completa (RMC), es posible reducir el tiempo de retención por debajo del reactor RMC tomado como referencia.

Los métodos de retención de biomasa son básicamente dos:

- inmovilización sobre un soporte (filtros anaerobios y lechos fluidizados);
- agregación o floculación de biomasa y su retención por gravedad (reactores de lecho de lodos).

El filtro anaerobio. En este sistema las bacterias anaerobias están fijadas a la superficie de un soporte inerte, formando biopelículas, columna de relleno (torre empacada), o atrapadas en los intersticios de éste, con flujo vertical. El soporte puede ser de material cerámico o plástico. Su distribución puede ser irregular (filtro anaerobio propiamente dicho, con flujo ascendente), en cuyo caso las bacterias se encuentran mayoritariamente atrapadas en los intersticios (Figura 17b); o regular y orientado verticalmente, caso en el cual la actividad es básicamente debido a las bacterias fijadas, y recibe el nombre de lecho fijo con flujo descendente (Figura 17a). En caso de utilizar un soporte orientado verticalmente con flujo ascendente y un sustrato lentamente degradable, con elevado tiempo de retención, la retención por sedimentación de los fragmentos de biopelícula desprendidos adquiere un efecto de importancia en la actividad del reactor.

Figura 17: Reactores con retención de biomasa



Fuente: IDAE

Este sistema ha sido extensamente aplicado en el tratamiento de aguas residuales de la industria agroalimentaria y existen experiencias piloto para la fracción líquida de residuos ganaderos. El costo de inversión es una limitante importante para su implementación.

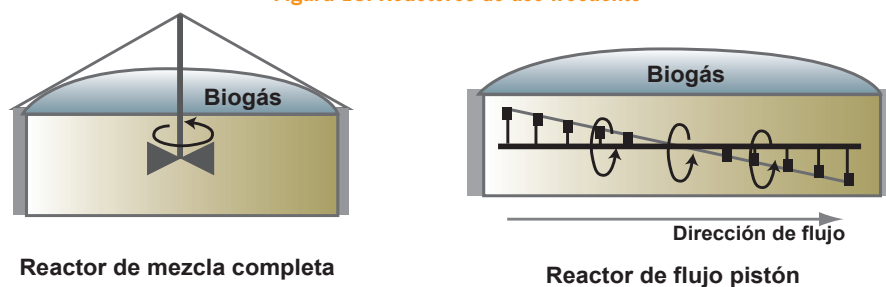
El reactor de lecho de lodos. En este sistema se favorece la floculación o agregación de bacterias entre ellas, para formar gránulos o consorcios, de forma que por sedimentación se mantienen en el interior del reactor, con la velocidad ascendente adecuada del fluido, siempre que en la parte superior exista un buen separador sólido/líquido/gas. El diseño más común es el Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), el cual está siendo extensamente aplicado al tratamiento de aguas residuales de la agroindustria (Figura 17c). Es el diseño más simple de entre los sistemas con retención de biomasa y la única limitante para su aplicación es que la biomasa activa granele, esto es, que forme agregados de alta densidad. Para ello es determinante la composición del agua a tratar y mantener una operación adecuada.

El lecho fluidizado. En este sistema, las bacterias se encuentran fijas – formando una biopelícula – sobre pequeñas partículas de material inerte que se mantienen fluidizadas mediante el flujo ascendente del fluido. Para mantener un caudal adecuado que permita la expansión y fluidización del lecho, se recurre a la recirculación. Igual que en el caso del filtro anaerobio, este sistema puede ser aplicado a aguas residuales, especialmente de la agroindustria, y a fracciones líquidas o sobrenadante de residuos de la producción animal, aunque las experiencias en este ámbito son limitadas (Figura 17d).

3.2.2 Reactores más frecuentemente usados

En general, en el mercado europeo, predominan dos de los tipos de reactores descritos en el capítulo anterior, principalmente por su estabilidad y/o su simplicidad en comparación con otros procesos de digestión anaerobia: reactores de mezcla completa (con y sin recirculación) y reactores de flujo pistón. La siguiente figura muestra esquemáticamente ambos tipos de reactores.

Figura 18: Reactores de uso frecuente



La Tabla 6 resume las principales características del reactor de mezcla completa, así como sus ventajas y desventajas.

Tabla 6: Características de los reactores de mezcla completa

Características	- Estanques verticales de sección circular. - Construcción en acero u hormigón armado. - Volúmenes posibles sobre los 3.000 m³, pero no recomendables. - Velocidades de carga posibles en el rango de 1 a 3 kg SV/m³d.
Áreas de aplicación	- Para sustratos bombeables, con contenidos de sólidos medios/bajos a bajos (máximo de 12%) como purines, residuos orgánicos con purines, restos pulposos, aguas residuales de alto contenido orgánico, etc. - Apropriados para procesos continuos, discontinuos y semi-continuos.
Ventajas	- Operación variable para procesos continuos, discontinuos y semi-continuos. - En general es posible la mantención de equipos internos sin necesidad de vaciado completo del reactor. - Posibilidad de cubrir con membrana y ahorrarse un gasómetro.
Desventajas	- Cubierta del reactor relativamente compleja para tanques de gran tamaño. - Debido a que la mezcla no es vigorosa puede producirse un régimen de mezcla no ideal y, con ello, flujos de corto circuito (entrada y salida de material en corto tiempo) y formación de costras. - Dificultad para mantener temperatura homogénea y controlada.

Figura 19: Ejemplos de reactores de mezcla completa



Fuente: LfL y Bundesverband Biogas

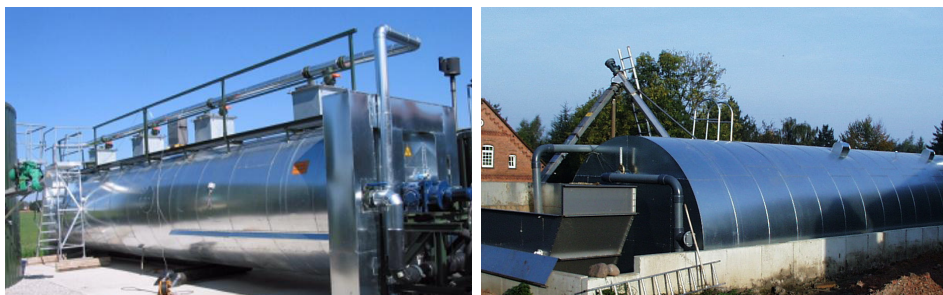
Otro tipo de reactores utilizado comercialmente corresponde a los reactores de flujo pistón. El hecho que la tasa de crecimiento de microorganismos sea más elevada a la entrada del reactor, donde la concentración de sustrato también es más elevada, hace que la concentración media en el reactor sea superior a la correspondiente a los de mezcla completa, o en todo caso superior a la de salida, con lo cual el tiempo de retención será inferior. Este tipo de reactor ha sido aplicado a diferentes especies de residuos orgánicos, como la fracción orgánica de residuos municipales (configuración vertical y flujo ascendente) y residuos de porcino y bovino.

A continuación, se muestran las características generales de este tipo de reactores.

Tabla 7: Características de los reactores de flujo pistón

Características	- Estanques horizontales de secciones circular o cuadrada. - Construcción en acero u hormigón armado. - Volúmenes máximos posibles entre los 800 a 1.000 m³. - Velocidades de carga posibles superiores a 5 kg SV/m³d.
Áreas de aplicación	- Para sustratos con contenidos de sólidos medios a medios/altos (sobre 12%) como estiércoles, residuos agroindustriales con alto contenido de fibras, fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU), cultivos energéticos, etc. - Apropriados para procesos continuos y semi-continuos.
Ventajas	- Configuración compacta y bajo uso de terreno. - Separación de las fases del proceso de digestión anaerobia. - Prevención de formación de costras debido a su forma de construcción y agitación. - Prevención de flujos de corto circuito. - Requieren tiempos de retención hidráulicos menores por la separación de las fases (mayor eficiencia). - Calefacción más efectiva debido a su forma compacta.
Desventajas	- Tamaños grandes de plantas requieren varios reactores paralelos. - Mantenimiento o reparación de equipos internos requiere generalmente el vaciado del reactor.

Figura 20: Ejemplos de reactores de flujo pistón



Fuente: LfL

3.2.3 Sistemas en dos fases/etapas e híbridos

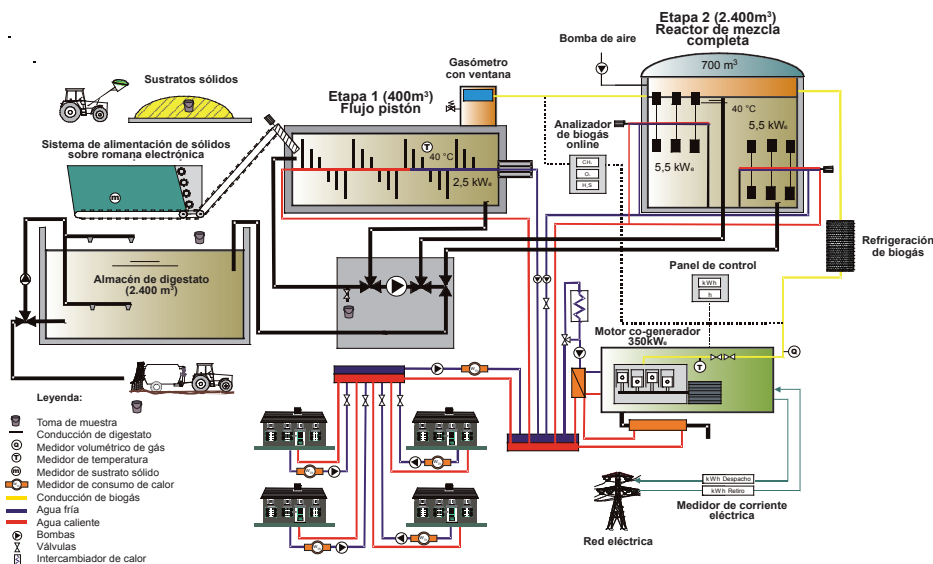
Son sistemas que utilizan dos reactores especializados en distintas fases de la digestión anaerobia. Algunos consisten en un primer reactor con elevado tiempo de retención, en el cual se favorece la hidrólisis, seguido de un reactor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa. Si la primera etapa consiste en un reactor discontinuo, el

líquido tratado en la segunda es el obtenido por percolación en la primera, una vez recirculado el efluente de la segunda. Estos sistemas permiten mantener fácilmente la temperatura en el reactor discontinuo, controlando la temperatura del efluente del segundo reactor. Han sido aplicados con éxito para tratar residuos sólidos cuya etapa limitante es la hidrólisis: frutas, verduras, residuos sólidos urbanos, ganado vacuno, etc.

En otros sistemas la separación de fases se refiere a mantener dos reactores en serie, en los cuales se realizan, respectivamente, las fases de acidogénesis y metanogénesis, y su objetivo es conseguir un tiempo de retención global inferior al correspondiente a un único reactor de mezcla completa. La separación es de tipo cinético, controlando el tiempo de retención de cada reactor, el cual será inferior en el primero, debido a las tasas de crecimiento más altas de las bacterias acidogénicas. Este tipo de sistema ha sido aplicado con éxito en la digestión de residuos con alta concentración de azúcares y bajo contenido en sólidos, pero no en residuos con fibras y, en general, en sustratos complejos cuya limitante es la hidrólisis.

Por su parte, los sistemas híbridos combinan los conceptos que sustentan los diferentes tipos de reactores descritos previamente. La Figura 21 esquematiza una planta de este tipo. En ella un reactor de flujo pistón es utilizado para realizar, con una corta retención hidráulica, la fase de acidogénesis y el reactor de mezcla completa es utilizado para realizar, con una mayor retención hidráulica, la fase de metanogénesis. También se han realizado diseños de reactores con retención de biomasa híbridos, en los cuales la parte baja de éste se comporta como un UASB y la parte superior como un filtro.

Figura 21: Ejemplo de sistema híbrido (reactor flujo pistón + mezcla completa)



Fuente: Traducido de LfL

3.2.4 Reactores para alto contenido de sólidos

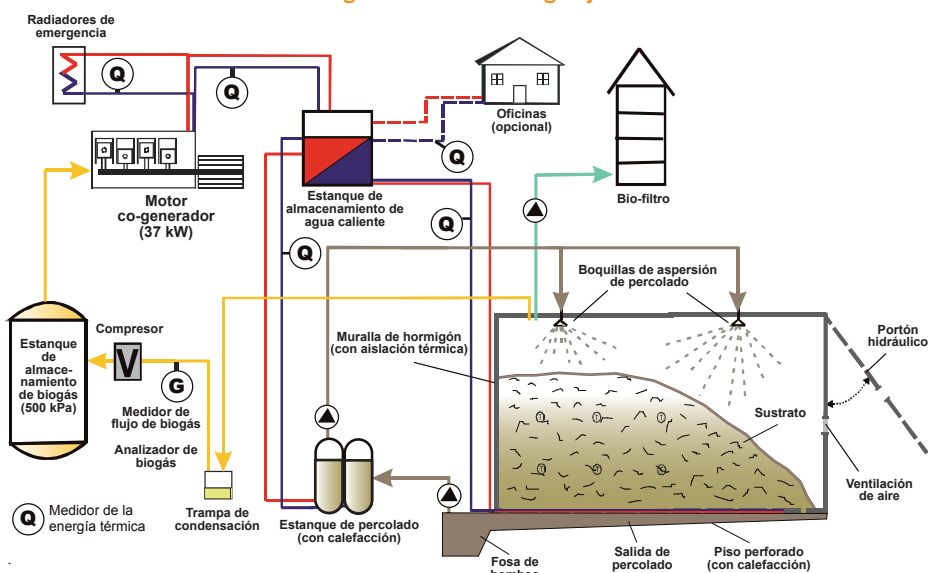
3.2.4.1 Sistema de garaje

En el sistema tipo garaje, los contenedores son utilizados para la digestión anaerobia de residuos orgánicos sólidos en forma discontinua (batch). El volumen de los reactores no supera normalmente los 100 m³. Dependiendo del sustrato y del sistema de alimentación (normalmente cargador frontal), sólo se puede aprovechar 2/3 del volumen para la fermentación. Para proporcionar una adecuada digestión de los sustratos se requiere inocularlo con el digestato de la fermentación anterior. Por lo mismo, es frecuente utilizar una mezcla con sólo un 40% de material fresco y 60% de digestato.

La retención hidráulica es de aproximadamente tres a seis semanas dependiendo de la degradabilidad del sustrato. Para mantener durante ese lapso de tiempo la humedad constante en el sustrato, se bombea en forma de recirculación el lixiviado producido durante el proceso, que es recolectado en el fondo del reactor por un sistema de drenaje e inyectado a través de un sistema de ducha. De esta forma se logra también mantener la temperatura y una inoculación bacteriana constante.

Durante la fase inicial, debido al bajo contenido de metano del biogás, éste es bombeado a través de un biofiltro al exterior. En cuanto el biogás alcanza un contenido por sobre el 30% de metano, es almacenado para su posterior uso. Para poder producir en forma constante se requieren de varios módulos que funcionen en forma secuencial. Este sistema puede ser ampliado de forma modular y, por lo tanto, adaptarse a las necesidades del operador de la planta.

Figura 22: Sistema de garaje



Fuente: traducido de LfL

3.2.4.2 Sistema de estanque

Este sistema de digestión anaerobia discontinua es el más sencillo de operar, pero a su vez, el más ineficiente. La tecnología consiste en un estanque, normalmente de murallas de hormigón, la cual se rellena con el residuo orgánico a degradar. Una vez llena se cierra en forma hermética con una cubierta de membrana que actúa como gasómetro. El tiempo que demore el proceso de digestión anaerobia dependerá de la temperatura ambiental. Cuando el sistema deja de generar gas, se retira la cubierta de membrana y se extrae el digestato para su aplicación como fertilizante o mejorador de suelo en el campo. Para inocular el siguiente llenado, se deja un volumen aproximado de un 30% del digestato, el cual hay que mezclar en forma homogénea con el sustrato fresco a digerir, y se vuelve a tapar. Al igual que el sistema de garaje, se requiere de varios módulos trabajados en forma secuencial para producir biogás en forma continua en el tiempo.

Figura 23: Sistema de estanque



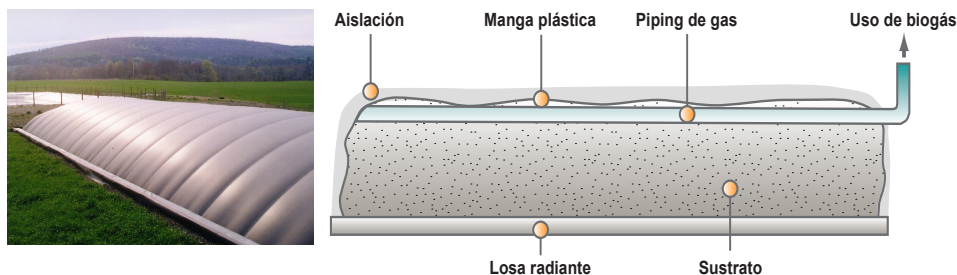
Fuente: LfL

3.2.4.3 Sistema de manga plástica

El sistema de manga plástica corresponde al sistema más económico de producción de biogás, bajo el punto de vista de la inversión. En este caso se utiliza un equipo de llenado de manga plástica (el mismo equipo que se utiliza para grano de maíz húmedo) para incorporar el sustrato a degradar dentro de la manga. En el lado superior interno de la manga se instala una manguera perforada para recoger el biogás producido y ser llevado a un gasómetro para su posterior uso.

En este sistema se puede utilizar un sistema de losa radiante para controlar la temperatura de la manga o sencillamente trabajar con la temperatura ambiental, como en el caso del sistema de estanque.

Figura 24: Sistema de manga plástica



Fuente: EPA; traducido de LfL

3.2.4.4 Sistemas de lagunas cubiertas

Un sistema alternativo al modelo de biodigestor vertical es el sistema de lagunas cubiertas. Se trata de lagunas o piscinas, cuyo fondo está recubierto por PVC, HDPE u otro material impermeable, resistente. La piscina se encuentra totalmente cubierta y sellada herméticamente por una membrana de PVC u otro material de alta resistencia a los rayos ultravioleta.

Estos sistemas son diseñados para tratar cualquier tipo de materia orgánica. Se diseñan en diferentes tamaños dependiendo de la disponibilidad de residuos o requerimientos del proyecto. Los tamaños pueden ir desde los 10 m³ hasta cientos de m³.

Las piscinas pueden estar instaladas en tierra firme o en concreto, la decisión tiene relación con aspectos de costos. Es recomendable protegerlo del sol. En caso de tener exceso de producción de biogás, este puede ser almacenado en un reservorio auxiliar fabricado en membranas de PVC o HDPE, colocado en paralelo al sistema de piscina cubierta y conectado por medio de una tubería de PVC.

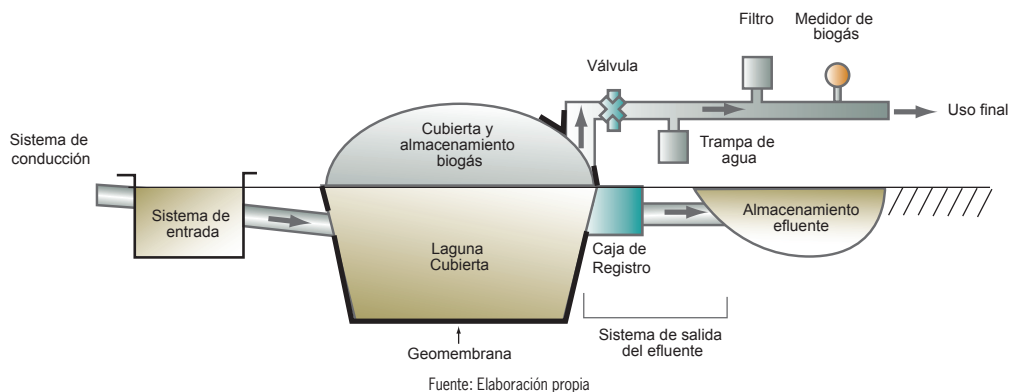
En general este tipo de biodigestor es de diseño muy simple y se le pueden incorporar sistemas de calefacción y de agitación pero, por la forma, son menos eficientes que los biodigestores verticales.

Un sistema de biogás del tipo piscina cubierta está conformado por diversos componentes: sistema de conducción de sustrato, sistema de entrada, sistema de salida del digestato, sistema de salida del biogás, sistema de conducción del biogás, válvulas y trampas, llaves de paso, sistemas de desagüe de las lagunas cubiertas y medidor de biogás. A continuación se entrega mayor detalle de cada componente:

- 1. Sistema de conducción de sustrato:** a través de una cañería que puede ser de PVC, HDPE o de concreto se conduce el sustrato a tratar hasta el interior de la piscina o laguna.
- 2. Sistema de entrada:** se coloca antes de la entrada del sustrato a la piscina. Puede ser un tanque desarenador que cumple con la función de retener aquellos materiales pesados e inertes que le restan funcionamiento al sistema de laguna.
- 3. Sistema de salida del digestato:** junto con canalizar el digestato fuera del biodigestor, suele contar con una caja de registro con el objeto de medir pH y composición de la materia orgánica ya tratada en el sistema.
- 4. Sistema de salida del biogás:** se ubica en la parte superior de la cubierta. Se trata de un acople de PVC que va sellado a la geomembrana. Al acople se conectará el sistema de conducción de biogás.
- 5. Sistema de conducción del biogás:** se hace por medio de tuberías de polietileno de alta densidad, con una serie de válvulas y trampas hasta el lugar donde se utilizará el biogás.
- 6. Válvulas y Trampas:**
 - Válvula para sobrepresiones: estas válvulas evitan el rompimiento de la membrana por el exceso de presión al interior del biodigestor debido al acumulamiento excesivo de biogás. En un sistema que maneje una gran cantidad de biogás se utilizará un manómetro, que controla la resistencia a la tensión de la geomembrana.

- Trampa de agua y ácido sulfhídrico: con el objeto de proteger los equipos y mejorar los rendimientos energéticos es importante extraer o reducir el agua, el ácido sulfhídrico y el dióxido de carbono del biogás. El agua causa problemas de obstrucción del sistema de conducción del biogás, en tanto el ácido sulfhídrico, causa corrosión en los motores y malos olores y el dióxido de carbono resta poder calorífico al biogás.
 - Dado lo expuesto es necesario colocar las siguientes trampas:
 - Trampa de ácido sulfhídrico
 - Trampa o filtro de dióxido de carbono
 - Trampa de agua
 - Trampa de llama
- 7. Llaves de paso:** estas llaves cumplen con el objetivo de controlar el paso del gas en caso que no se esté utilizando o se deba realizar alguna reparación o mantención.
- 8. Sistema de desagüe de las lagunas cubiertas:** necesarios para hacer reparaciones u otros mantenimientos. Se colocan en el fondo de la piscina.
- 9. Medidor de biogás:** se coloca con el objetivo de medir la cantidad de gas producido por el sistema de laguna cubierta.

Figura 25: Esquema de sistema de lagunas cubiertas



3.2.5 Sistemas de calefacción

Existen varios sistemas de calefacción que pueden utilizarse para mantener la temperatura del reactor. Uno de los sistemas más utilizados es la instalación de un serpentín radiador al interior de los estanques (acero u hormigón armado). Otro sistema utilizado frecuentemente es el de superficies radiantes, que utiliza las paredes del reactor (hormigón armado) para el transporte de calor (losa radiante). En ambos casos se utiliza agua caliente para el transporte de la energía térmica desde la caldera o el motor de cogeneración hasta el reactor.

Figura 26: Sistemas de calefacción de digestores



Fuente: Planta de biogás Negrete Chile 30 kW (sustrato purines de vacuno), UTEC GmbH

3.2.6 Sistemas de agitación

Un elemento importante para la reacción microbiológica es el mezclado del sustrato. A través de éste se garantiza el contacto del mismo con las colonias bacterianas que degradan la materia orgánica y se evita la formación de costras flotantes en el reactor. Pero su función más importante es mantener homogénea la temperatura dentro del reactor para obtener un proceso estable.

Dependiendo de las características de la mezcla dentro del reactor, se pueden utilizar distintos tipos de agitadores en los estanques de digestión. Una selección de ellos se presenta en las siguientes tablas.

Tabla 8: Características de agitadores de hélice sumergible

Agitador de hélice sumergible	
	
Fuente: Planta de biogás Negrete Chile 30 kW (sustrato purines de vacuno), UTEC GmbH	
Características	- Agitadores de alta velocidad de mezcla (hasta 1.500 RPM), en general, de frecuencia no regulable. - Motor sumergible y hermético. - Fabricación en material resistente a la corrosión (acero inoxidable). - Posibilidad de posición ajustable a través de rieles o barras guía. - Funcionamiento discontinuo en intervalos. - Diámetro de hélices de 50 a 70 cm. - Potencias eléctricas entre 7 y 22 kW.
Áreas de aplicación	- Para sustratos bombeables, con contenidos de sólidos bajos (purines, mezclas con fracción de sólidos de hasta alrededor de un 10%). - Para reactores en el rango mesófilo de temperatura.
Ventajas	- Muy buena mezcla para sustratos líquidos.
Desventajas	- Para estanques grandes se requieren varios aparatos, lo que redundaría en un mayor número de perforaciones en el digestor. - Consumo energético alto para cada agitación. - Tendencia a producir capas duras flotantes en intervalos no operativos. - Mantenimiento de los equipos requiere apertura del estanque de digestión.

Tabla 9: Características de agitadores axiales de rotación lenta

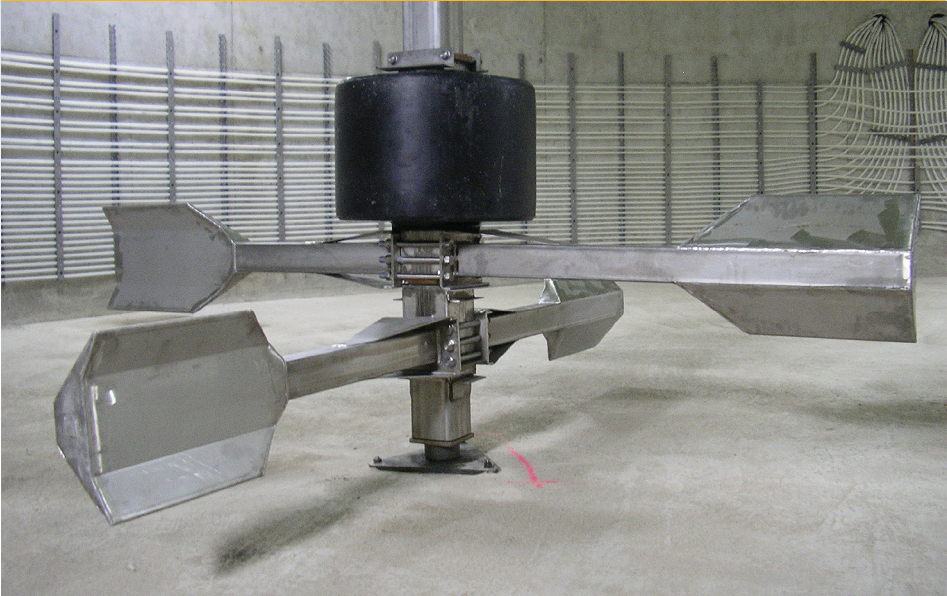
Agitador axial de rotación lenta	
	
Fuente: Kaiser	
Características	- Agitador de rotación lenta y operación continua (8 a 14 RPM). - Instalación en el centro del digestor. - Paletas de agitación de hasta 22 m de diámetro. - Motor de rotación colocado fuera del reactor. - Fabricación en material resistente a la corrosión (acero inoxidable). - Potencias eléctricas de entre 15 a 18 kW.
Áreas de aplicación	- Estanques verticales con cubierta soportante (hormigón). - Sustratos bombeables con contenido de sólidos medios (mayor a 10%).
Ventajas	- Fácil mantención del motor. - Pequeñas capas duras flotantes pueden mezclarse por movimiento rotatorio. - Operación continua ayuda a evitar formación de grandes capas duras flotantes.
Desventajas	- Debido a su operación estática solo es posible una mezcla insuficiente, especialmente en los bordes del digestor, para dimensionamientos incorrectos o velocidades de mezcla inadecuadas. - Posible formación de capas duras en los bordes del digestor para dimensionamientos incorrectos o velocidades de mezcla inadecuadas.

Tabla 10: Características de agitadores excéntricos

Agitador excéntrico	
	
Fuente: LfL	
Características	- Agitador de rotación semi-rápido y lento (100 a 300 RPM y 10 a 50 RPM), de operación a intervalos o continua, respectivamente. - Instalación oblicua a través de las paredes del reactor anaerobio. - Motor de rotación colocado fuera del reactor. - Fabricación en material resistente a la corrosión (acero inoxidable). - Diámetro de hélices entre 0,7 a 2,5 m. - Potencias eléctricas de en promedio 15 kW.
Áreas de aplicación	- Estanques verticales. - Sustratos bombeables con contenido de sólidos medios (mayor a 10%).
Ventajas	- Buena mezcla. - Fácil mantención del motor. - Pequeñas capas duras flotantes pueden mezclarse por movimiento vertical. - Operación continua ayuda a evitar formación de grandes capas duras flotantes.
Desventajas	- Debido a su operación estática solo es posible una mezcla insuficiente, especialmente en los bordes del digestor, para dimensionamientos incorrectos o velocidades de mezcla inadecuadas. - Posible formación de capas duras en los bordes del digestor para dimensionamientos incorrectos o velocidades de mezcla inadecuadas.

Tabla 11: Características de agitadores verticales y horizontales de paleta

Agitador de paletas	
	
Fuente: LfL	
Características	- Agitador de rotación lenta de operación continua (12 a 25 RPM). - Instalación lateral en reactores verticales. Para reactores de flujo pistón la dirección de rotación es perpendicular a la dirección del flujo. - Motor de rotación colocado fuera del reactor. - Fabricación en material resistente a la corrosión (acero inoxidable). - Diámetro de paletas entre 2 a 4 m. - Potencias eléctricas de entre 15 a 18 kW.
Áreas de aplicación	- Estanques verticales y reactores de flujo pistón. - Sustratos bombeables con contenido de sólidos medios (mayor a 10%). - Para reactores con un diámetro no mayor a 14 m.
Ventajas	- Buena mezcla. - Su operación en estanques horizontales posibilita el efecto del flujo pistón. - Fácil mantención del motor. - Operación continua ayuda a evitar formación de grandes capas duras flotantes.
Desventajas	- Debido a su operación estática solo es posible una mezcla insuficiente, especialmente en los bordes del digestor, para dimensionamientos incorrectos o velocidades de mezcla inadecuadas. - Posible formación de capas duras en los bordes del digestor para dimensionamientos incorrectos o velocidades de mezcla inadecuadas.

3.2.7 Almacenamiento del biogás

El biogás producido durante el proceso de digestión anaerobia debe ser almacenado a fin de contar con un respaldo suficiente para la operación de los equipos de generación. En general, se recomienda una capacidad de almacenamiento de entre un 25% y un 50% de la producción diaria de biogás.

Las formas habituales de almacenamiento de biogás en plantas de desarrollo comercial corresponden a sistemas de almacenamiento de baja presión. Éstos pueden ser integrados a los reactores anaerobios en forma de cubierta o de tipo externo, es decir, ubicados en un lugar separado de los estanques de digestión. En todos los casos se trata de sistemas de almacenamiento compuestos por láminas de materiales diversos que garanticen hermeticidad y resistencia. Sus características principales se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 12: Características del almacenamiento externo del biogás

Almacenamiento externo	
	
Fuente: Planta de biogás La Farfana, gentileza de Metrogas S.A.	
Características	- Volúmenes de hasta 2.000 m³. - Materiales apropiados: PVC (corta vida útil), goma sintética (PIB), mezcla de polietileno y polipropileno, PE, acero fino, fibra de vidrio. - Permeabilidad máxima entre 1 y 5 por mil. - Distintas formas de construcción e instalación (en bodega aparte, sobre el techo del digestor, con y sin cubierta, etc.).
Áreas de aplicación	- Todo tipo de biogás. - Todo tipo de reactores.
Ventajas	- La composición del biogás en el digestor puede ser medida con precisión y en tiempo real, dada la menor mezcla que se produce en el área gaseosa, y refleja mejor el estado de operación del digestor.
Desventajas	- Eventual necesidad de espacio adicional - Eventual necesidad de una construcción adicional. - El digestor requiere de una cubierta hermética adicional.

Tabla 13: Características del almacenamiento integrado del biogás

Almacenamiento integrado	
	
Fuente: FvB	
Características	- Volúmenes de hasta 4.000 m³. - Materiales apropiados: goma sintética (PIB), mezcla de polietileno y polipropileno, EPDM-goma. - Permeabilidad máxima entre 1 y 5 por mil. - Distintas formas de construcción e instalación (lámina simple sobre construcción de madera, lámina en techo inflable autosoportante, lámina sobre construcción bajo cubierta).
Áreas de aplicación	- Todo tipo de biogás. - Principalmente usados en biodigestores verticales.
Ventajas	- No requiere espacio ni construcciones adicionales.
Desventajas	- Composición del biogás en la zona gaseosa del digestor no refleja el estado del proceso en tiempo real, debido a la mezcla de gases de periodos de tiempo distintos. - Eventualmente sensible a cargas de viento y nieve. - Aislación térmica se ve disminuida.

Los sistemas de almacenamiento de biogás cuentan con mecanismos de seguridad que evitan que la sobrepresión límite sea sobrepasada. En caso de fallas del motor y aumento de la presión de los gasómetros, el biogás es desviado hacia una antorcha para su combustión controlada.

3.3 Utilización del biogás

La utilización energética del biogás ha sido el factor más importante en el desarrollo de esta tecnología en Europa. A través de la combustión de la fracción de metano el biogás puede utilizarse para la generación de energía térmica, eléctrica, para la generación simultánea de ambas (cogeneración) y, menos frecuentemente, para energía mecánica. Además, puede ser utilizado como sustituto de otros combustibles como el gas natural o gas de ciudad.

Las tecnologías para la utilización de biogás no difieren significativamente de las usadas para otros combustibles, siempre y cuando haya sido tratado adecuadamente. Por su parte, la cogeneración es en la actualidad la manera más eficiente de aprovechamiento energético del biogás. Por su importancia, este capítulo aborda algunos antecedentes generales para ambas materias: tratamiento del biogás y tecnologías de cogeneración.

3.3.1 Tratamiento del biogás

El biogás producido contiene algunos componentes que pueden interferir con el uso final proyectado. Tal es el caso del sulfuro de hidrógeno (H_2S) que en contacto con el vapor de agua, también presente en el biogás, genera ácido sulfhídrico, el que tiene efectos corrosivos en los metales. Además, la presencia de vapor de agua en el biogás disminuye su poder calorífico y puede interferir con la operación de los sistemas de combustión.

La siguiente tabla muestra los tratamientos necesarios según el destino del biogás.

Tabla 14: Tratamiento según el uso final del biogás

Uso final	Eliminación de agua	Eliminación de CO_2	Eliminación de H_2S (desulfurización)
Producción térmica en calderas	1	0	0-1-2
Producción de electricidad en motores estacionarios	1 o 2	0-1-2	1 o 2
Combustible para vehículos o para turbinas	2	2	2
Sustituto del gas natural	2	2	2
Celdas de combustible	2	2	2

0 = no tratamiento, 1 = tratamiento parcial, 2 = tratamiento elevado

Fuente: IDAE

Los pasos para el tratamiento primario del biogás son tendientes a remover el sulfuro de hidrógeno y el vapor de agua, lo cual es necesario para prácticamente todos los usos del biogás.

Para la remoción del sulfuro de hidrógeno se aplica comúnmente un mecanismo microbiológico que consiste en la utilización de bacterias (*Sulfobacter oxydans*) capaces de transformar el sulfuro de hidrógeno, en presencia de oxígeno, en azufre elemental. En numerosas plantas de escala pequeña a mediana (hasta 2 MW de generación eléctrica) se utiliza la desulfurización biológica al interior de la zona gaseosa del digestor, mediante la adición controlada de aire. Este proceso lleva asociado costos de inversión y operación menores, aunque provoca algún grado de interferencia con el proceso de digestión anaerobia si no se controla en forma automática.

La aireación excesiva del medio bacteriano puede provocar inhibiciones serias en el crecimiento y, en casos extremos, la pérdida de la población metanogénica. La utilización de un estanque de desulfurización externo elimina este riesgo, pero sus mayores costos de inversión y operación se justifican sólo en plantas de gran tamaño por las economías de escala alcanzables.

En caso de requerirse un biogás de mayor calidad puede utilizarse desulfurización química, aplicando sales de hierro al biogás producido. Su aplicación en la zona gaseosa del digestor tiene la ventaja de una menor intervención en el proceso anaerobio, pero conlleva costos operacionales adicionales asociados a las sustancias químicas adicionadas al proceso.

El uso de filtros de compost es un método de bajo costo que permite reducir las concentraciones de sulfuro de hidrógeno, pero que es de difícil control frente a cambios en la concentración. Este sistema sólo es recomendable para plantas de muy pequeña escala debido a su baja eficiencia de remoción de azufre.

Por su parte, el secado consiste en el enfriamiento del biogás para eliminar el vapor de agua a través de la condensación. Este proceso puede realizarse en las tuberías de distribución del biogás, asegurándose que la temperatura ambiental y la longitud de las tuberías sean suficientes para lograr el enfriamiento del biogás. La utilización de tuberías de gas enterradas facilita el proceso de enfriamiento del biogás. En estos casos debe disponerse de una trampa de condensación desde donde será eliminada el agua acumulada.

En algunas situaciones puede ser necesaria la utilización de un pequeño intercambiador de calor para el enfriamiento de los gases, el que reduce la temperatura del biogás, separando el vapor de agua. En estos casos se alcanza una mejor calidad del biogás, lo que redundará en una mejor operación y menor necesidad de mantenimiento del motor, pero que lleva asociados costos de operación algo mayores.

Si el destino final del biogás es la sustitución de gas natural, debe purificarse hasta asimilarlo a la calidad de ese combustible, de acuerdo a lo establecido en la norma chilena NCh3213.Of2010, sobre biometano. Este proceso corresponde a la eliminación del CO_2 de la mezcla de gases. Para este fin existen hoy en día seis tecnologías:

- a. **Lavado de gas:** absorción del CO_2 a través del lavado con líquidos (H_2O , NaOH , etc.).
- b. **Adsorción de cambios de presión:** adsorción de CO_2 por medio de fuerza electrostática en un medio de adsorción.
- c. **Sistema de membrana en seco:** separación de CO_2 a través de sistemas de membranas.
- d. **Sistema de membrana húmedo:** separación de CO_2 a través de sistemas de membranas permeables en conjunto con un medio líquido de absorción.
- e. **Dilución del CO_2 :** separación de fases en CO_2 líquido y CH_4 gaseoso.

- f. **Rectificación a baja temperatura:** separación de CO_2 por diferencial del punto de congelamiento y temperatura de -80°C y $+15^\circ\text{C}$.

Luego de su tratamiento el biogás pasa por un compresor donde se eleva su presión a los niveles necesarios para su inyección, a través de tuberías de alimentación, en los equipos de combustión (calderas o motores) o para su transporte, por ejemplo, mediante gasoductos.

3.3.2 Cogeneración

En el caso de la cogeneración, el biogás se utiliza para operar un equipo de generación termoeléctrica, generalmente con motores de combustión interna, al que se le incorporan sistemas de recuperación de calor o termorecuperadores, compuestos por intercambiadores de calor en los sistemas de refrigeración y de eliminación de gases de combustión que reducen la temperatura de los gases de 420°C hasta unos 150°C . De esta forma, parte del calor residual generado por la combustión de biogás, que no es transformado en energía mecánica y posteriormente eléctrica, es recuperado para su uso térmico posterior en procesos (agua caliente y vapor de baja temperatura) o para calefacción.

Mediante la cogeneración se obtiene energía de mayor valor agregado (energía eléctrica) lográndose además, a través de la recuperación y uso del calor de desecho, una alta eficiencia global en el uso del combustible (hasta 85%), reduciendo así la dependencia de otros combustibles fósiles y eventualmente más contaminantes.

Existen otras alternativas para la generación eléctrica a partir del biogás, como la utilización de motor Stirling, microturbinas de gas o celdas de combustible, que hasta ahora no han tenido un desarrollo comercial mayor, principalmente debido a sus altos costos de inversión, menores eficiencias eléctricas y falta de madurez de las tecnologías. Por esta razón, se entrega en esta guía información relevante sólo respecto a grupos electrógenos operados con motores de combustión interna.

Figura 27: Sistemas de generación eléctrica: motor Stirling, microturbina y celda de combustible



Fuente: LfL

Los equipos de cogeneración más utilizados corresponden a los motores de combustión con generador eléctrico y termorecuperadores incorporados. En la actualidad, estos equipos se comercializan en forma modular en distintos tamaños y capacidades (de 20 hasta 4.000 kW), como contenedores integrados que se pueden instalar en cualquier planta de biogás. En dichos módulos se encuentran, tanto el motor de combustión interna, como el generador eléctrico y todos los demás equipos periféricos como compresor de gas, termorecuperadores, distribuidores de calor para calefacción, paneles de control, protecciones, etc.

Son dos las variantes más utilizadas para la generación de energía termoeléctrica, las cuales se diferencian sólo en el tipo de motor empleado: motores a gas de combustión en ciclo Otto y motores con encendido diesel. En el caso de los primeros, la combustión se origina en la chispa producida por bujías eléctricas. En el caso de los motores con encendido diesel, se agrega en la cámara de combustión una pequeña parte de diesel (generalmente un 10%) que al comprimirse origina la combustión de la mezcla.

En ambos casos el motor acciona un generador eléctrico y entrega energía térmica a través de intercambiadores de calor en los circuitos de refrigeración del motor y de evacuación de gases escape. Las características de ambos tipos de motores pueden observarse en las siguientes tablas.

Tabla 15: Características de los motores para biogás con encendido diesel

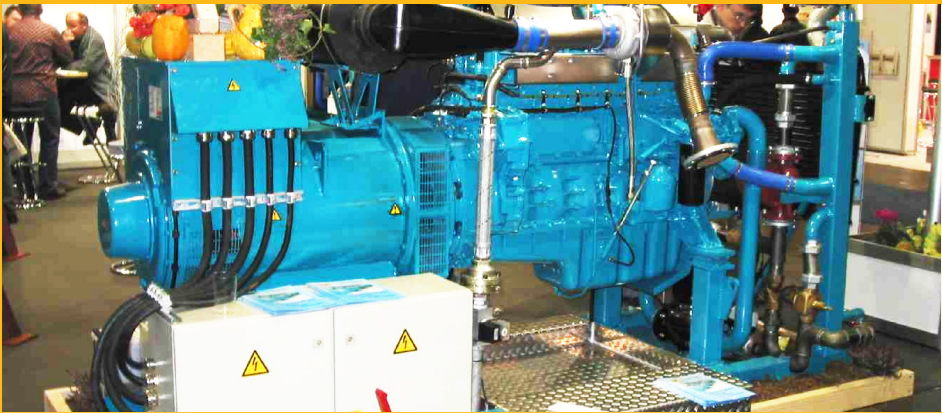
Motor con encendido diesel	
	
Fuente: LfL	
Características	- Encendido mediante la adición de diesel en la mezcla (hasta 10%). - Sistemas con potencias eléctricas de hasta 540 kW. - Vida útil de alrededor de 35.000 horas de operación. - Eficiencias eléctricas desde 30% a 40% (para potencias pequeñas, las eficiencias son cercanas a 35%). - Eficiencia térmica de 40% a 43%.
Áreas de aplicación	- Todo tipo de biogás. - Especialmente rentables en plantas pequeñas.
Ventajas	- Uso con bajos costos de inversión de motores estándar (diesel). - Alta eficiencia eléctrica en bajas escalas de potencia (75-150 kW).
Desventajas	- Eficiencia global menor que en motores de gas en ciclo Otto. - Uso de combustible fósil (diesel) reduce grado de renovabilidad de la energía y aumenta costos de operación (fracción de diesel en promedio de 10%). - Mayores emisiones asociadas (NO_x, SO_x y material particulado). - Mayor necesidad de mantención por calcinamiento de inyectores.

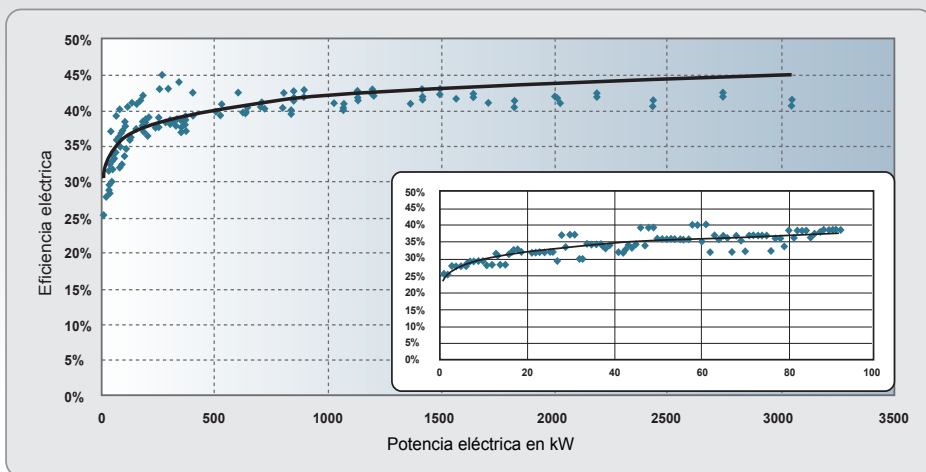
Tabla 16: Características de los motores para biogás en ciclo Otto

Motor en ciclo Otto	
	
Fuente: Central Loma Los Colorados II, gentileza KDM Energía S.A.	
Características	- Operación en cuatro tiempos con encendido mediante bujías. - Sistemas con potencias eléctricas desde 50 kW hasta varios MW. - Vida útil de alrededor de 60.000 horas de operación. - Eficiencias eléctricas desde 28% a 43% (para potencias pequeñas, las eficiencias son cercanas a 30%; sobre 500 kW, eficiencias sobre 40%). - Eficiencia térmica de 34% a 56%.
Áreas de aplicación	- Todo tipo de biogás. - Especialmente rentables en plantas de mayor escala.
Ventajas	- Diseño especial para combustión de gases. - Menores emisiones que los motores con encendido diesel. - Menor necesidad de mantención y mayor vida útil. - Eficiencia global mayor que los motores con encendido diesel (sobre 80%).
Desventajas	- Costos levemente mayores que los motores con encendido diesel. - En rangos bajos de potencia presentan eficiencias menores que los motores de encendido diesel.

Las eficiencias eléctricas, en general, van desde 35% para potencias eléctricas bajas (entre 75 y 100 kW), hasta 43% para potencias eléctricas sobre los 2.000 kW. Las eficiencias térmicas de este tipo de sistemas varían también en rangos similares, siendo las eficiencias globales de alrededor de 75% a 85%.

El gráfico a continuación muestra la variación de la eficiencia eléctrica de los grupos generadores en base a biogás, expresada como porcentaje de la potencia nominal de entrada (disponible en el biogás), en función de la potencia eléctrica instalada.

Figura 28: Eficiencia eléctrica de grupos generadores en base a biogás



Fuente: ASUE

Figura 29: Grupos generadores: en contenedor y en casa de máquinas



Fuente: Central Loma Los Colorados II – Gentileza KDM Energía S.A.

Para aquellas ocasiones en que los equipos de generación están fuera de funcionamiento (períodos de mantenimiento), se dispone de una antorcha de seguridad para la quema controlada del biogás. El arranque de la línea alternativa de gas hacia la antorcha debe localizarse entre el compresor y el motor, a fin de asegurar el flujo del biogás hasta la antorcha. Es conveniente diseñar, tanto la antorcha, como el compresor de biogás de manera que ambos puedan funcionar simultáneamente, debido a que puede darse el caso que el consumo del motor operando a plena carga no sea suficiente para utilizar toda la producción de biogás. Esta situación puede deberse a un aumento inesperado de la calidad del sustrato

o una mejora no esperada del proceso biológico. En tales casos es ineficiente desactivar el motor para quemar el excedente en la antorcha, sumado a que cada detención y puesta en marcha del motor conlleva deterioros progresivos, por lo que debiera asegurarse el funcionamiento simultáneo de ambos componentes para este tipo de casos eventuales.

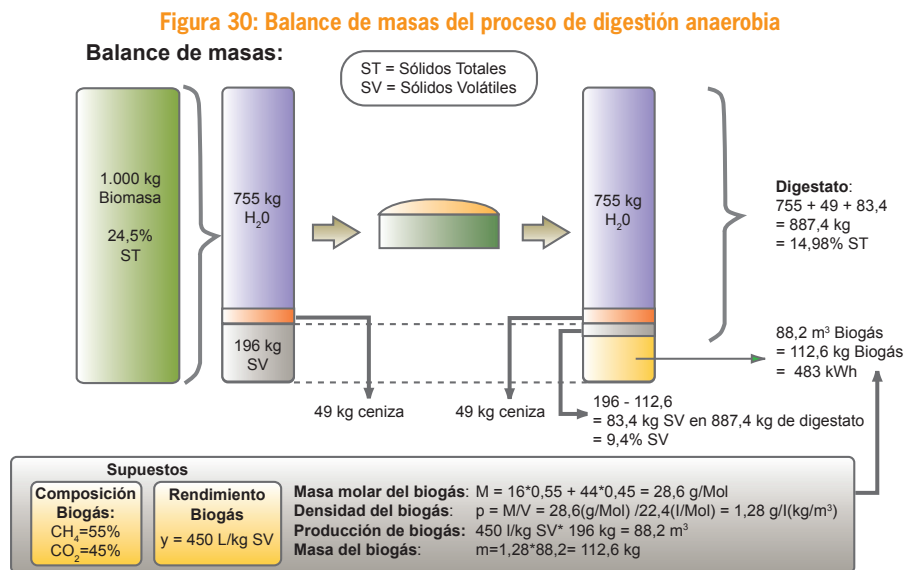
3.4 Dimensionamiento de una planta de biogás

Para el diseño de una planta de biogás debe tenerse en cuenta fundamentalmente el tipo de sustrato disponible y sus cantidades, así como su producción a lo largo del año y variación estacional.

En general, mientras más uniforme y homogéneo sea el tipo de sustrato empleado, mayor será la seguridad en la estabilidad del proceso. Por otra parte, el tipo de sustrato determinará el tipo de equipamiento que deberá tener la planta de biogás (por ejemplo, unidad alimentadora de material fibroso, estanque de mezcla, etc.).

Además, con la finalidad de mitigar la emisión de olores producto de la degradación de la biomasa no digerida se recomienda un diseño y operación de la planta que garantice tiempos de residencia largos, mayores de 30 días, a fin de obtener un alto grado de abatimiento de la materia orgánica y, por ende, de estabilización del digestato.

La siguiente figura muestra un ejemplo de cálculo de balance de masas en el proceso de digestión anaerobia que permite formarse una idea de los volúmenes involucrados en la producción de biogás. El sustrato corresponde a estiércol de vacuno con un contenido de sólidos totales (ST) de 24,5%, el cual es degradado a un digestato con un contenido de ST de sólo 14,98%. Esto se obtiene por la transformación a biogás de 112,6 kg de biomasa por tonelada de estiércol, equivalentes a 88,2 m³ de biogás.



Fuente: Adaptado de Kaiser

A continuación se entregan algunos consejos prácticos para el diseño de una planta de biogás.

3.4.1 Manejo de los sustratos

Si se trata de sustratos residuales, se recomienda reducir las necesidades de almacenamiento de los mismos a un mínimo, fundamentalmente para evitar las emisiones de olores y la descomposición indeseada previa de la materia orgánica, con su consecuente pérdida de producción de biogás.

Para residuos con bajo contenido de sólidos se recomienda contar con un estanque pulmón hermético con capacidad de almacenamiento de un máximo de tres días de operación. Para sustratos sólidos o fibrosos (restos vegetales, animales, alimentos vencidos, desechos de gastronomía) se recomienda procesarlos a la brevedad, dado que durante su almacenamiento se produce una rápida descomposición aerobia, generándose olores y perdiéndose parte de la materia orgánica para la producción de biogás.

En caso de tratarse de una planta para tratamiento anaerobio de residuos orgánicos sólidos en las cercanías de áreas pobladas, debe considerarse la recepción de la materia prima en un galpón cerrado con sistemas de ventilación y biofiltros para la captura de emisiones de olores.

En caso de utilizarse reactores de mezcla completa, con bajas velocidades de carga orgánica, se recomienda la incorporación de una etapa de homogenización de los sustratos para asegurar una viscosidad que les permita ser bombeados. La alimentación de material fibroso puede hacerse posteriormente al homogenizado o, en algunos casos, directamente (ver capítulo 3.1).

3.4.2 Dimensionamiento de los digestores

Para el dimensionamiento de los digestores debe considerarse:

- La cantidad máxima diaria de sustrato que se recibirá (en m³/día o t/día).
- El tiempo de residencia hidráulico mínimo requerido (en general, mayor a 35 días, para sustratos de origen animal se requieren tiempos mayores, ver capítulo 2).
- La velocidad de carga orgánica máxima (ver capítulo 2).

El volumen de diseño corresponde a la cantidad máxima diaria de sustrato a utilizar, por la retención hidráulica mínima requerida para los sustratos.

$$V_R = TRH \cdot V$$

Donde V_R es el volumen neto del reactor, TRH es el tiempo de retención hidráulico y V es el volumen del sustrato alimentado por día.

Dicho volumen puede repartirse entre uno o varios estanques de digestión y posdigestión, los que deberán estar aislados térmicamente y contar con equipos de agitación e instrumentos de medición de volumen, análisis de gases y sistemas de evacuación y (eventualmente) almacenaje del biogás.

Para asegurar una agitación apropiada se recomienda evitar el uso de estanques de diámetros demasiado grandes (mayores a 25 m). La altura de los estanques debe considerar una altura libre entre el nivel de sustrato y el borde superior del estanque de, a lo menos, un 5% respecto a la altura total del estanque.

El diseño de fermentadores y posfermentadores en línea tiene la ventaja de ser un sistema de funcionamiento redundante que es más flexible en caso de fallas. Su desventaja radica en los mayores costos de inversión, por el equipamiento de los reactores, y mayores costos de operación, por el bombeo y agitación de sustratos en los reactores.

En todos los casos debe considerarse la protección contra la corrosión del material del estanque, fundamentalmente en la zona de interfaz húmedo-gaseosa, esto es, sobre el nivel freático del estanque, sea a través de una cubierta con pintura epóxica, el uso de placas o láminas sintéticas (PE, PVC u otros), de fibra de vidrio o el uso de acero esmaltado o inoxidable.

Para evitar la pérdida de calor durante los meses de invierno, con la consecuente baja de temperatura y de la actividad metanogénica, debe considerarse tanto la calefacción del material dentro del reactor, como la aislación térmica del mismo.

3.4.3 Dimensionamiento del almacenamiento de biogás

La tecnología más usada para el almacenamiento de biogás es la de almacenamiento integrado en biodigestores con techo hermético flexible de doble membrana. En general, los techos almacenadores garantizan un tiempo de operación cercano a las seis horas.

Los techos almacenadores operan generalmente con sobrepresiones máximas de alrededor de 5 mbar. Además, se debe contar con sistemas medidores y de seguridad para casos de exceso de sobrepresión.

3.4.4 Dimensionamiento de equipos de generación eléctrica o de cogeneración

En caso que se utilicen equipos de generación eléctrica o cogeneración integrados a la planta de biogás, su tamaño será función de la producción horaria de biogás que puede generar la planta. Conocida la cantidad de sustrato que se alimentará diariamente y sus características (ver capítulo 2.5) puede determinarse la cantidad de metano que se generará cada hora y que será consumida por el grupo generador. A partir del poder calorífico del metano (9,96 kWh/m³) se puede determinar la energía y potencia disponible en el biogás.

$$E_{total} [kWh] = Q_{biogás} \cdot m \cdot 9,96$$

$$P_{nom} [kW] = E_{total} / 24$$

donde:

E_{total} = Energía disponible por día

$Q_{biogás}$ = Cantidad diaria de biogás en m³

m = Fracción de metano en el biogás en %

P_{nom} = Potencia nominal disponible asumiendo generación constante de energía

Utilizando una aproximación para la eficiencia eléctrica de 40%, se determina el rango de potencia eléctrica que se considerará. Contrastando ese valor con los obtenidos del gráfico presentado en la Figura 27, se podrá realizar una estimación más fina de la potencia instalada.

$$P_e [kW] = P_{nom} \cdot \eta_e$$

donde:

$$\begin{aligned} P_e &= \text{Potencia eléctrica} \\ \eta_e &= \text{Eficiencia eléctrica (en \%)} \end{aligned}$$

Para la estimación de la potencia térmica de un sistema de cogeneración se recomienda considerar una eficiencia térmica de entre 40% y 45%, tomando en cuenta que para eficiencias eléctricas más altas, el valor correspondiente a la eficiencia térmica será menor.

$$P_t [kW] = P_{nom} \cdot \eta_t$$

donde:

$$\begin{aligned} P_t &= \text{Potencia térmica} \\ \eta_t &= \text{Eficiencia térmica (en \%)} \end{aligned}$$

Dado que, en general, se requiere de tiempo para la mantención de los equipos, se considera que la disponibilidad de los mismos para la generación de energía es de un 90% a 93%. De esta forma, la cantidad de energía anual factible de generar por un sistema de cogeneración vendrá dada por:

$$E_e [kWh] = P_e \cdot 0,9 \cdot 8.760$$

$$E_t [kWh] = P_t \cdot 0,9 \cdot 8.760$$

donde:

$$\begin{aligned} E_e &= \text{Energía eléctrica anual generada} \\ E_t &= \text{Energía térmica anual generada} \end{aligned}$$

Siendo 8.760 el número total de horas por año y 0,9 el factor de planta que en este caso se ha asumido similar a la disponibilidad de los equipos, pues se ha supuesto una producción constante y homogénea de biogás (en caso de contarse con garantías del proveedor del grupo generador puede utilizarse un valor superior, cercano al 0,93).

3.4.5 Dimensionamiento del almacenamiento de digestato

Previo a su disposición el digestato es almacenado en un estanque final. Dicho contenedor debe estar provisto de agitadores para evitar la formación de costras y no requiere de calefacción ni aislación térmica. En algunos casos el digestato aún puede contener una pequeña parte de materia orgánica degradable, la que puede generar biogás y olores. Por ello se recomienda la incorporación de un techo hermético para evitar emanaciones, sobre todo en zonas cercanas a áreas pobladas o para proyectos de mediana a gran escala (mayores a 50 kW).

Al igual que en el dimensionamiento de los digestores, el volumen diario de sustratos a utilizar se multiplica por el tiempo que se necesite almacenar el digestato, lo que dependerá del destino final de éste y de la frecuencia de su disposición. Tanto desde un punto de vista medioambiental como de optimización del uso del digestato como fertilizante, puede ser conveniente dimensionar el sistema de almacenamiento de modo de acumularlo durante el periodo en que no se requiere fertilización de praderas o cultivos.

3.5 Cuidados en la operación de plantas de biogás

El riesgo de fallas asociado a proyectos de biogás puede separarse en los riesgos de falla de los equipos en general y problemas del proceso biológico.

3.5.1 Fallas asociadas a la operación de equipos

Respecto a las tecnologías y equipos utilizados en este tipo de plantas, dado que se trata de equipos fabricados de manera industrial, con largos años de investigación y desarrollo en su diseño y numerosas aplicaciones a nivel mundial, se considera que el riesgo tecnológico asociado a ellos es menor. Sin embargo, a fin de minimizar los efectos de posibles problemas en el funcionamiento de los equipos, es conveniente contar con empresas proveedoras que sean capaces de ofrecer servicios de asistencia técnica y, en algunos casos, como cuando se trata de equipos de cogeneración, contar con contratos de mantención.

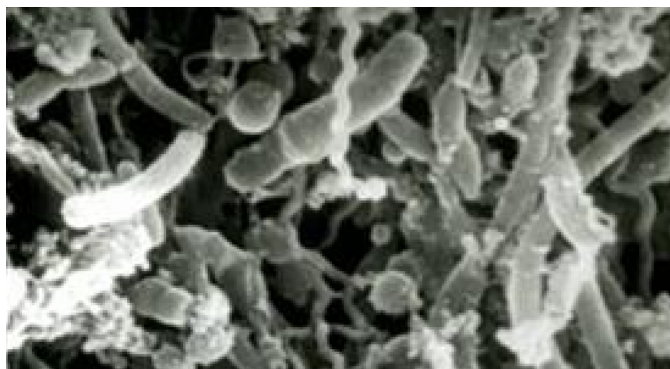
Un aspecto importante es la calidad del material de fabricación de los estanques. En general, además de la impermeabilidad de los estanques, debe asegurarse una protección suficiente contra la corrosión debido al ataque de ácidos como el ácido sulfhídrico existente en el biogás.

3.5.2 Fallas asociadas al proceso biológico

Los riesgos más importantes del proceso microbiológico están asociados a la operación de las plantas de biogás. El principal problema consiste en mantener las condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo de las poblaciones bacterianas, especialmente de las bacterias metanogénicas encargadas de la última parte del proceso, debido a que son las más sensibles a los cambios del medio y las de menor velocidad de reproducción. Generalmente, los problemas que se presentan en el proceso biológico se verán reflejados tanto en la cantidad como en la composición del biogás producido, ya sea disminuyendo su cantidad o la concentración de metano.

El problema más común es la acidificación del medio o sustrato al interior del reactor, lo que provoca una reducción de la actividad metanogénica, incrementa la acumulación de ácidos provenientes de las primeras fases del proceso y el cese total de la producción de metano, de no mediar una acción externa. Por otra parte, la acidificación del medio favorece la formación de compuestos inhibidores, como el ácido sulfhídrico a partir del sulfuro de hidrógeno (H_2S), lo que puede llevar al sistema a colapsar completamente.

Figura 31: Vista microscópica de comunidad bacteriana anaerobia



Las principales causas de la acidificación del medio corresponden a:

- 1. Sobrecarga hidráulica:** se genera cuando existe un repentino aumento en el caudal de alimentación en reactores de flujo continuo, provocando simultáneamente la salida de material sin degradar y el lavado de la población bacteriana activa. De esta forma, y debido a las diferencias en sus tasas de crecimiento, se rompe el equilibrio entre las poblaciones acidogénicas y metanogénicas.
- 2. Sobrecarga orgánica:** ocurre cuando se produce un aumento repentino de la alimentación del digestor con materia orgánica, sea por aumento de la velocidad de carga (alimentación excesiva) o por cambios repentinos en el sustrato a uno, con una mayor concentración de materia orgánica. En este caso, las bacterias acidogénicas generarán una mayor cantidad de ácidos que las bacterias metanogénicas existentes no serán capaces de procesar, activándose así el proceso de acidificación. También puede generarse una sobrecarga orgánica con una puesta en marcha muy rápida.
- 3. Sobrecarga de tóxicos:** El proceso es sensible a una serie de compuestos tóxicos o inhibidores, entre los que se incluyen bactericidas, metales pesados y amonio, entre otros. Un compuesto importante entre los tóxicos es el oxígeno que puede ingresar al reactor por una adición excesiva de aire para la desulfurización biológica o por una mezcla a excesiva velocidad del sustrato, generando así la inhibición de la actividad metanogénica y la acumulación de ácidos.

La temperatura de operación es otro de los factores de suma importancia que debe ser controlado. La supervivencia y la actividad de las colonias bacterianas, y con ello la estabilidad del proceso, dependerán fuertemente de la mantención de la temperatura en los rangos de operación óptimos (véase capítulo 2). Además, en sustratos conteniendo residuos de animales se debe mantener la temperatura por sobre los 35°C para garantizar la eliminación de elementos patógenos, a fin de evitar propagar alguna enfermedad.

Para minimizar los riesgos de operación de estos sistemas, debe tenerse especial cuidado en el control de los siguientes parámetros que dan una indicación del estado del reactor:

- 1. Temperatura:** Debe controlarse y mantenerse en los rangos de operación. En caso de fallas en los sistemas de calefacción del digestor, debe asegurarse una rápida reparación o una eventual utilización de un sistema auxiliar de calefacción.
- 2. pH:** El valor pH del reactor debe monitorearse constantemente y verificarse su estabilidad. El rango óptimo de operación debe ser determinado durante la fase de marcha blanca de la planta.
- 3. Composición del biogás:** El contenido de metano del biogás producido puede dar una idea acertada del estado del reactor. Una baja en la fracción de CH_4 del biogás indica la caída de la actividad bacteriana y, con ello, la presencia de problemas de operación. En general, este efecto se produce relativamente rápido, en comparación con los cambios en el nivel de pH, por lo que es conveniente asegurar un monitoreo continuo de la composición del biogás.
- 4. Acidez:** El contenido de acidez da una idea de la acumulación de ácidos grasos volátiles en el interior del reactor y su control permite prevenir la acidificación del reactor, con la subsecuente disminución del pH y la actividad metanogénica.

- 5. FOS/TAC:** Relación de acidez con alcalinidad. Parámetro especialmente desarrollado para el control de estabilidad de un reactor anaeróbico que relaciona los ácidos orgánicos volátiles (FOS) con el carbonato inorgánico total (TAC).
- 6. Amonio:** El contenido de amonio es un buen indicador de una mezcla no adecuada para la producción de biogás. Esta concentración aumenta cuando la relación C/N es inadecuada. Una alta concentración amoniacal inhibe el proceso microbiológico llegando al extremo de la paralización total de la actividad bacteriana.

Durante la etapa de marcha blanca de este tipo de plantas deben verificarse los parámetros óptimos de operación y control, esto es, velocidad de carga y mezclado, temperatura, rangos de pH y composición del biogás. El objetivo es mantener una producción de biogás estable, con una fracción de metano que varíe de la menor manera posible en el tiempo. Una vez determinados los parámetros de operación óptimos, éstos deben ser programados para asegurar una operación sincronizada y estable del reactor y todos sus componentes (agitadores, bombas, sistemas de alimentación, etc.).

En caso de detectarse problemas debe suspenderse la alimentación del digestor, para dar tiempo a las bacterias metanogénicas de degradar la eventual acumulación de ácidos y re-estabilizar el proceso.

