Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales

Red de Tratamiento y reciclaje de aguas industriales mediante soluciones sostenibles fundamentadas en procesos biológicos.
(TRITÓN-316RT0506)

PROGRAMA IBEROAMERICANO
CYTED
CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO

Autores:

Elba Vivanco. Centro NBC (Núcleo Biotecnología de Curauma). Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV).

Dra. Rosa Yaya. Centro CITRAR. Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Ingeniería (Perú)

Dr. Rolando Chamy. Escuela de Ingeniería Bioquímica (PUCV). Director Centro NBC (Núcleo Biotecnología de Curauma).

RED TRITÓN 316RT0508

PROGRAMA CYTED

ISBN: 978-84-09-08638-2

ÍNDICE

1. Tratamiento biológico anaerobio de aguas y residuos industriales 4

1.1. Conceptos básicos sobre el tratamiento anaerobio 4
1.2. Vista general de sustratos 7

2. Características generales de una planta de biogás 10

2.1. Manejo de los sustratos 11
2.2. Producción de biogás 14
2.2.1. Reactor de digestión anaerobia 14
2.2.2. Agitadores 14
2.2.3. Almacenamiento del biogás 19
2.3. Tratamiento primario del biogás 20
2.4. Utilización del biogás 22
2.5. Tratamiento y disposición de los lodos digeridos 26
2.6. Problemas de operación 30

3. Principales tipos de reactores anaerobios 33

3.1. El reactor de mezcla completa 34
3.2. El reactor de flujo pistón 35
3.3. El reactor de dos fases 37
3.4. El reactor UASB 38

4. Principales parámetros de operación 39

5. Consideraciones para los análisis de rentabilidad 47

5.1. Costos de inversión, operación y mantenimiento 47
5.1.1. Costos de inversión 47
5.1.2. Costos de operación 49
5.1.3. Costos de mantenimiento 50

6. Planificación de un proyecto de biogás 51

6.1. Primer paso: estimación del potencial 52
6.2. Pre-factibilidad: emplazamiento, selección de tecnología y diseño conceptual ... 53
6.3. Factibilidad: análisis del sustrato e ingeniería base 54
6.4. Realización del proyecto 56
6.5. Puesta en marcha y operación de la planta 57

7. Claves para el éxito de un proyecto de biogás 57

7.1. Requisitos necesarios. Criterios KO 58
7.2. Condiciones para la viabilidad técnica 58
7.3. Condiciones para la viabilidad económica 59

8. Bibliografía 60

1. Tratamiento biológico anaerobio de aguas y residuos industriales

1.1. Conceptos básicos sobre el tratamiento anaerobio

El tratamiento anaerobio es una de las tecnologías más antiguas para estabilizar los residuos y aguas residuales principalmente para el tratamiento de residuos domésticos (aguas) en fosas sépticas, el tratamiento de lodos en digestores y para el tratamiento de lodos de depuradoras en plantas de tratamiento municipales. La necesidad de sistemas de tratamiento más rentables para la industria alimentaria, combinada con la aparición de una crisis petrolera internacional, fue la fuerza impulsora que estimuló la creación de reactores en los años setenta en el campo de la digestión anaerobia.

El tratamiento anaerobio consiste en un proceso realizado por grupos bacterianos específicos que en ausencia de oxígeno trasforman la materia orgánica en una mezcla de gases, fundamentalmente metano y CO_2, conocida como biogás. La materia orgánica puede estar compuesta por residuos sólidos orgánicos o aguas residuales provenientes de las industrias con contenido de materia orgánica.

El proceso de digestión anaerobia para la generación de biogás se realiza normalmente en tanques cerrados denominados reactores y presenta beneficios económicos y ambientales como consecuencia de la producción de energía. Tal como se muestra en la Figura 1, como producto de la degradación de la materia orgánica se obtienen: (i) biogás de elevado poder energético (ii) un lodo estabilizado que es el producto resultante del crecimiento microbiano generado como consecuencia del proceso de digestión, así como también de sólidos no digeridos que han sido estabilizados. Este lodo puede ser utilizado en agricultura o en la recuperación de suelos degradados que presenten carencia, especialmente de materia orgánica.

El proceso de producción de biogás puede esquematizarse en cuatro etapas principales, de acuerdo a lo mostrado por la Figura 2. Las poblaciones bacterianas involucradas en cada una de las etapas del proceso cumplen roles específicos y requieren condiciones ambientales apropiadas para su crecimiento y viabilidad. La mantención y estabilidad de estas condiciones al interior de los reactores utilizados para digestión anaerobia representa, entonces, el desafío principal de toda la operación para este tipo de plantas.

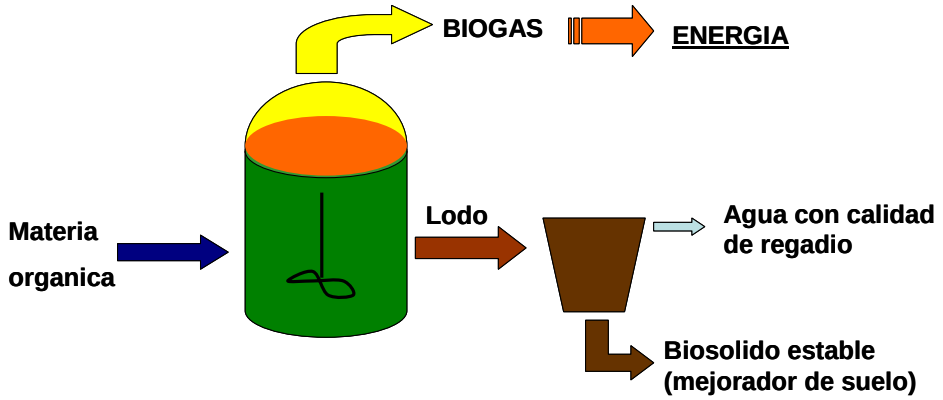

Figura 1. Esquema básico del proceso de digestión anaerobia.

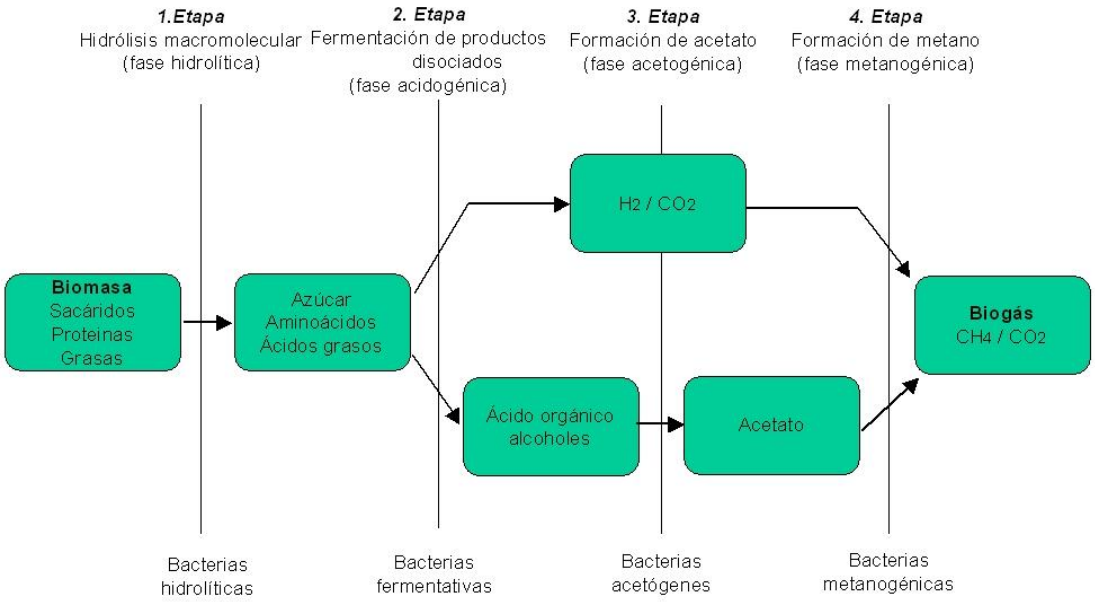

Figura 2. Las 4 etapas del proceso de digestión anaerobia.

El biogás producido por la descomposición microbiológica está compuesto principalmente de metano y de dióxido de carbono. Dependiendo de los contenidos de grasas, carbohidratos y proteínas de los distintos sustratos, la fracción de metano contenida en el biogás varía desde valores que van de 50 a 75%. En la Tabla 1 pueden observarse los principales componentes del biogás y los rangos en que varían sus diferentes concentraciones.

Tabla 1. Rangos de composición del biogás. La concentración de ácido sulfhídrico usualmente varía de 150 a 3000 ppm. Esta concentración puede variar dependiendo de la concentración de azufre en el agua residual del afluente.

Componente	Concentración en % (volumen)
Metano (CH_4)	50-75%
Dióxido de Carbono (CO_2),	45-25%
Vapor de Agua (H_2O)	2 - 7%
Nitrógeno (N_2)	<2%
Oxígeno (O_2)	<2%
Hidrógeno (H_2)	<1%
Amoniaco (NH_3)	<1%
Ácido Sulfhídrico (H_2S)	<5%

En el caso que las cuatro etapas indicadas en la Figura 2 se realicen en un mismo reactor se denomina proceso de una etapa y si existe una separación física de las dos primeras etapas y las dos últimas, corresponde a un proceso de dos etapas. En el caso de las plantas de biogás comerciales existentes en Europa, se utilizan sistemas de una etapa. Esto principalmente porque, en general, los sistemas de dos etapas requieren inversiones y costos de operación más altos y son utilizados para mejorar la fase hidrolítica. Sin embargo, esto sólo se justifica para casos de sustratos de difícil degradación o procesos en los que se quiere evitar una eventual inestabilidad (degradación de residuos con alto contenido de sólidos y sólidos volátiles y con cambios frecuentes en la alimentación de los reactores).

En general, las plantas de biogás comerciales trabajan en procesos de tipo continuo, es decir, los digestores son alimentados continuamente (input) y tanto el biogás como el lodo digerido son retirados del reactor en la misma medida (output).

1.2. Vista general de sustratos

La materia orgánica utilizada para la producción de biogás se conoce con el nombre de sustrato. En general, los sustratos más utilizados para la producción de biogás corresponden a residuos orgánicos de diversa naturaleza, dado que, sea por razones de necesidad de tratamiento, o disposición o para un eventual mejor aprovechamiento de las materias primas, corresponden a materia orgánica de costo cero o cuyo tratamiento y utilización puede significar incluso un ahorro de costos.

También es posible que el sustrato utilizado corresponda a las aguas residuales de las industrias con alto contenido de materia orgánica, por ejemplo efluentes de la industria vitivinícola, de la elaboración de productos lácteos, del beneficio de ganado, entre otros.

La experiencia en diversos países, principalmente en Alemania, muestra que también es posible utilizar materia orgánica proveniente de determinados cultivos. Sin embargo, este uso está asociado a subvenciones a la energía que permiten cubrir los mayores costos asociados al sustrato.

La composición del sustrato utilizado determina la cantidad y composición final del biogás producido. En general, las grasas y aceites tienen un rendimiento en biogás (medido como m^3/t SV) mayor, con un contenido de metano medio. Las proteínas tienen un rendimiento comparativamente más bajo, con un contenido de metano mayor. En el caso de los carbohidratos, éstos tienen un rendimiento medio, con un menor contenido de metano. La humedad en el interior del reactor es también de vital importancia, tanto para el proceso biológico (las bacterias requieren agua para su supervivencia) como para efectos de mezcla y manejo al interior del reactor y los sistemas de alimentación de la planta. La Tabla 2 muestra los rangos de rendimiento y concentración de metano para los distintos tipos de compuestos orgánicos.

Tabla 2. Rangos de rendimiento y concentración de metano para distintos tipos de compuestos orgánicos.

Grupos de substancias	Rendimiento Biogás (m^3/t SV)	Fracción de Metano (%)
Proteínas digeribles	600-700	70-75
Grasas digeribles	1000-1250	68-73
Carbohidratos	700-800	50-55

En general, debe evitarse el uso de sustratos de alto contenido de lignina, como aserrín, hojas secas, etc., dado que ésta no se descompone fácilmente por métodos biológicos y genera una barrera que impide la degradación de los otros compuestos. Esto puede generar como efecto colateral la formación de capas flotantes en los reactores, las que impiden la mezcla del sustrato al interior del mismo y, con ello, se inhibe hasta grados muy significativos la actividad bacteriana.

Debido a que, comúnmente, la composición de los distintos sustratos varía dentro de determinados rangos, en forma genérica no es posible entregar un valor categórico respecto de la productividad y la composición del biogás proveniente de ellos. Sin embargo, es posible entregar rangos de valores que, en líneas generales, son válidos para los distintos tipos de sustrato. Para casos de la evaluación exhaustiva de algún proyecto concreto, con un tipo definido de sustrato, es conveniente tomar muestras representativas del mismo, estudiar la composición del sustrato y realizar ensayos de degradabilidad anaerobia. De esta forma, pueden obtenerse valores más acertados de la productividad para una planta de biogás, disminuyendo así en forma significativa la incertidumbre en la evaluación.

Existe una gran variedad de tipos de biomasa aptos para ser usados como sustratos para la producción de biogás. En la Tabla 3 se presentan algunas características generales para la planificación de un proyecto de biogás de los sustratos más comunes utilizados. Si bien es cierto que los valores aquí presentados pueden variar en rangos amplios, éstos pueden entregar una aproximación suficiente para la primera evaluación de un proyecto de biogás en base a residuos u otro tipo de materia orgánica. En caso realizarse ensayos para una determinación más precisa del potencial de biogás de un determinado sustrato o mezcla de sustratos, es recomendable determinar tanto las características aquí presentadas, como los contenidos de C, H, O y N, así como de fósforo (P) y amonio (NH_4^+). Para ello, como ya se mencionó, la determinación del potencial de metanización para cada residuo es esencial.

Tabla 3. Características generales de los sustratos más comunes utilizados en Proyectos de biogás.

Sustrato	Sólidos Totales (ST) [%]	Sólidos Volátiles (SV) [% ST]	Rendimiento Biogás m³/t	Rendimiento Biogás m³/t SV	Fracción de Metano [%]
Purines y estiércol					
Purines Vacunos	8-11	75-82	20-30	200-500	60
Purines Porcinos	app. 7	75-86	20-35	300-700	60-70
Estiércol Vacuno	app. 25	68-76	40-50	210-300	60
Estiércol Porcino	20-25	75-80	55-65	270-450	60
Estiércol de Ave	app. 3	63-80	70-90	250-450	60
Guano de ave para carne	40-55	75-87	100-200	250-450	60
Cultivos energéticos					
Maíz ensilado	20-35	85-95	170-200	450-700	50-55
Centeno ensilado	30-35	92-98	170-200	550-700	app. 55
Remolacha azucarera	23	90-95	170-180	800-860	53-54
Pastos ensilado (verde)	25-50	70-95	170-200	550-620	54-55
Residuos de Agroindustria					
Orujo cervecero	20-25	70-80	105-130	580-750	59-60
Orujo de grano	6-8	83-88	30-50	430-700	58-65
Orujo de papas	6-7	85-95	36-42	400-700	58-65
Orujos de frutas	2-3	app. 95	10-20	300-650	58-65
Pulpas	app. 13	app. 90	80-90	650-750	52-65
Agua de frutas	3-7	70-75	50-56	1500-2000	50-60
Melaza	80-90	85-90	290-340	360-490	70-75
Orujo de manzanas	25-45	85-90	145-150	660-680	65-70
Orujos de otras frutas	25-45	90-95	250-280	590-660	65-70
Orujo de uvas	40-50	80-90	250-270	640-690	65-70
Residuos animales (mataderos)					
Grasa de separadores	2-70	75-93	11-450	app. 700	60-72
Residuos de cerdo	12-15	75-86	20-60	250-450	60-70
Residuos de vacuno	11-19	80-90	20-60	200-400	58-62
Otros residuos					
Alimentos vencidos	9-37	80-98	50-480	200-500	45-61
Desechos de mercados	5-20	80-90	45-110	400-600	60-65

2. Características generales de una planta de biogás

En este apartado se entregan características generales del proceso de producción de una planta de biogás y sus campos de aplicación a partir del tratamiento de residuos orgánicos. La Figura 3 entrega una visión general del funcionamiento de una planta de biogás para generación de energía eléctrica y térmica. La Figura 4 muestra una planta de biogás industrial. Dependiendo del sustrato empleado, se utilizan distintos tipos de alternativas para los distintos componentes de la planta. Esto tendrá notable influencia en la configuración final de la planta y en sus costos de inversión y operación.

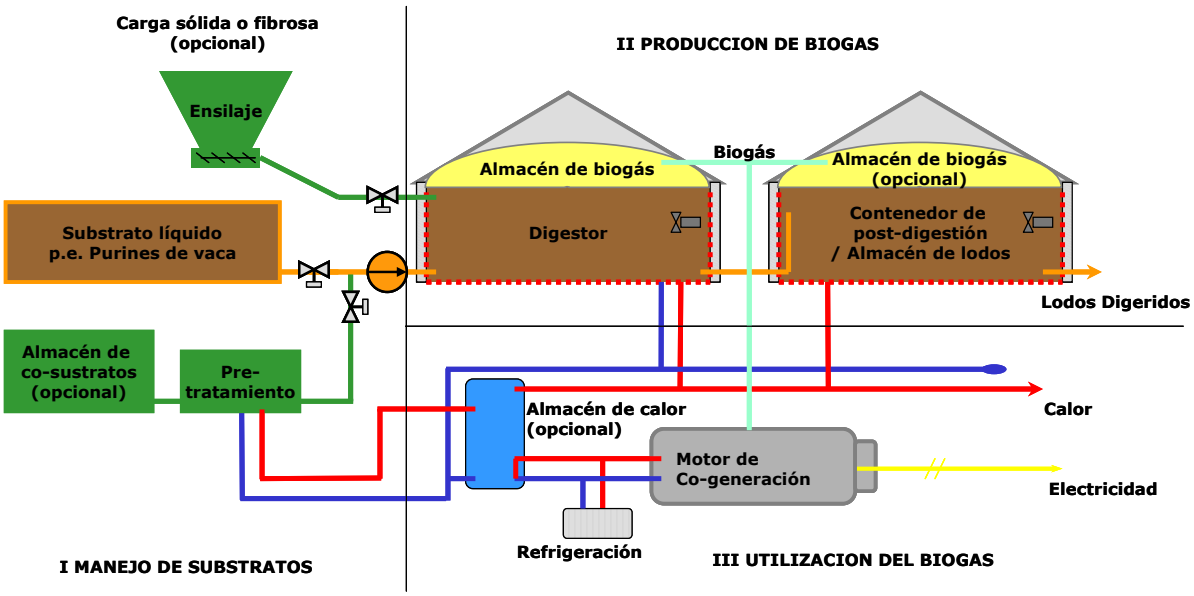

Figura 3. Esquema general de una planta de biogás para generación de energía eléctrica y térmica.

Figura 4. Planta de biogás.

2.1. Manejo de los sustratos

Para la recepción y manejo de los sustratos debe tenerse especial cuidado tanto en su consistencia como en su proveniencia. En el caso de sustratos con alto contenido de humedad, como algunos restos de frutas, pulpas vegetales, entre otros, la recepción y almacenamiento puede realizarse en fosos de recepción cerrados. La entrada de este tipo de residuos debe realizarse 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 de sustrato hacia el digestor. 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 la zona de acopio de los purines en los sectores de crianza con la planta de biogás, por medio de tuberías y bombas, dado que el transporte de purines en camiones cerrados es de costos elevados y requiere un alto esfuerzo logístico para plantas de escalas pequeñas (del orden de cientos de kW de potencia eléctrica instalada).

Para la recepción de materia más sólida o fibrosa, como cultivos energéticos o desechos de vegetales, debe distinguirse la zona de almacenamiento de la zona de alimentación. 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 asfaltada separada por muros verticales que crean las naves de ensilado (Figura 5). El sustrato se almacena en estas naves y va siendo retirado paulatinamente para su alimentación en el digestor.

Para otro tipo de desechos vegetales fibrosos, cuya frecuencia de descarga sea más distribuida en el tiempo, puede utilizarse un patio de acopio con capacidad para uno a dos días de carga, de manera 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 (largo tiempo de almacenaje a pleno sol, p.ej.)
- Minimización de olores

Figura 5. Ejemplos de silos transitables para cultivos energéticos.

Los equipos utilizados para la alimentación de los sustratos al digestor dependerán de su consistencia y características. En caso de utilizar material más sólido puede ser conveniente realizar una etapa de pretratamiento, consistente en el pre-picado del sustrato, a fin de asegurar un tamaño de fibra tal que ofrezca suficiente superficie de contacto para la acción bacteriana (Figura 6).

Figura 6. Picador rotatorio en tubería de transporte de sustrato.

Para la alimentación de sustratos de bajo contenido de sólidos es apropiado el uso de bombas centrífugas apropiadas para el transporte de material contaminado con algún tipo de fibra (bombas para el transporte de purines con restos de paja y forraje, por ejemplo). Para el transporte de sustratos de mayor contenido de sólidos también se pueden utilizar bombas de cavidad progresiva (Figura 7). Éstas son ampliamente utilizadas en plantas de biogás en base a cultivos energéticos.

Figura 7. Mezcladores de sustratos fluidos y fibrosos: mezclador con picador y bomba de paletas rotatorias (izquierda) y mezclador con bomba de cavidad progresiva (derecha).

Para la alimentación del digestor con materiales sólidos (granos, ensilajes con tamaños de fibra grandes, etc.) conviene utilizar sistemas de tornillo sin fin. Una alternativa integrada consiste en un tanque de acero inoxidable con tornillo sin fin para transporte y cortador incorporado. Puede utilizarse la alternativa de alimentación directa del digestor o aplicarse un paso intermedio de mezcla con los sustratos más líquidos en un tanque de mezcla previa (Figura 8). 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, debiendo cambiar con relativa frecuencia (2 a 3 años) partes importantes del equipo.

Figura 8. Sistema de alimentación con tanque externo y cargador frontal.

Otro sistema utilizado, de mayores costos, consiste en un bunker de hormigón con piso móvil y tornillos sinfín (Figura 9). En este caso, el material transportado por camiones tipo tolva es descargado directamente en el búnker y es transportado desde ahí por tornillos sin fin para su posterior procesamiento y alimentación al digestor.

Figura 9. Sistema de alimentación con bunker de piso móvil y tornillo sin fin.

2.2. Producción de biogás

2.2.1. Reactor de digestión anaerobia

El reactor o reactores de digestión anaerobia consisten en el centro de toda planta de generación de electricidad por medio de biogás. Nuevamente, el tipo de tecnología apropiado dependerá fuertemente del tipo de sustrato empleado y de sus condiciones y características. En el apartado 3 de este manual se profundiza en este punto.

2.2.2. Agitadores

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 capas duras flotantes en el reactor. Dependiendo del tipo de sustrato, se pueden utilizar distintos tipos de agitadores en los reactores de digestión. En las siguientes tablas se presenta una selección de dichos agitadores.

Tabla 4: Características de agitadores de propela sumergible.

Características	• Agitadores de alta velocidad de mezcla, 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.
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. • Prevención y destrucción de capas duras flotantes a través de su posición ajustable.
Desventajas	• Para tanques grandes se requieren varios aparatos, lo que redunda en un mayor número de perforaciones en el digestor. • Consumo energético alto para cada agitación. • Tendencia a la producción de capas duras flotantes en los intervalos de no operación. • Mantención de los equipos requiere apertura del tanque de digestión.

Figura 10. Agitador de propela sumergible.

Tabla 5. Características de agitadores axiales de rotación lenta.

Características	• Agitador de rotación lenta y operación continua. • 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).
Áreas de aplicación	• Reactores verticales con cubierta soportante (hormigón). • Sustratos bombeables con contenido de sólidos medios (mayor a 10%).
Ventajas	• Buena mezcla. • Mantención fácil del motor. • Pequeñas capas duras flotantes pueden ser mezcladas por el movimiento rotatorio. • Operación continua ayuda a la prevención de la formación de capas duras flotantes de gran superficie.
Desventajas	• Debido a su operación estática 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 inadecuada.

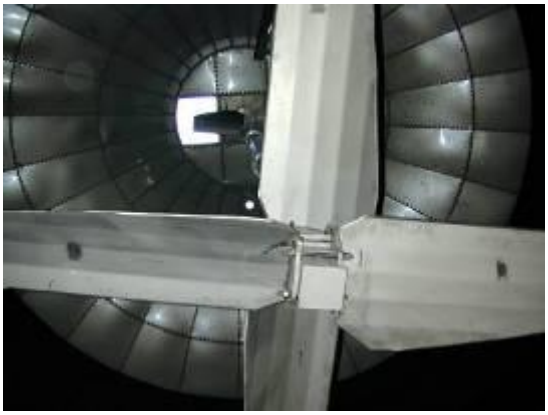

Figura 11. Agitador axial (vista inferior).

Tabla 6. Características de agitadores excéntricos.

Características	• Agitador de rotación semi rápida y lenta (100 a 300 y 10 a 50 RPM), de operación a intervalos o contínua 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).
Áreas de aplicación	• Reactores verticales. • Sustratos bombeables con contenido de sólidos medios (mayor a 10%).
Ventajas	• Buena mezcla. • Mantención fácil del motor. • Pequeñas capas duras flotantes pueden ser mezcladas por el movimiento rotatorio. • Operación contínua ayuda a la prevención de la formación de capas duras flotantes de gran superficie.
Desventajas	• Debido a su operación estática 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 inadecuada.

Tabla 7. Características de agitadores horizontales de paleta.

Características	• Agitador de rotación lenta de operación continua. • 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).
Áreas de aplicación	• Reactores verticales y reactores de flujo pistón. • Sustratos bombeables con contenido de sólidos medios (mayor a 10%).
Ventajas	• Buena mezcla. • Su operación en tanques horizontales posibilita el efecto del flujo pistón. • Mantención fácil del motor. • Operación continua ayuda a la prevención de la formación de capas duras flotantes de gran superficie.
Desventajas	• Debido a su operación estática 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 inadecuada.

Figura 12. Agitador horizontal de paleta.

2.2.3. 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 100% 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. Estos pueden ser integrados a los reactores anaerobios en forma de cubierta o de tipo externo, es decir, ubicados en un lugar separado de los reactores de digestión. En todos los casos se trata de sistemas de almacenamiento compuestos por láminas de materiales diversos que garanticen hermeticidad y resistencia. Las características principales se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 8. Características del almacenamiento externo del biogás.

Características	• Volúmenes de hasta 2000 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.
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	• Eventualmente necesidad de espacio adicional. • Eventualmente necesidad de una construcción adicional. • El digestor requiere de una cubierta hermética adicional.

Tabla 9. Características del almacenamiento integrado del biogás.

Características	• Volúmenes de hasta 4000 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, para reactores verticales y transversales.
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 períodos de tiempo distintos. • Eventualmente sensible a cargas de viento y nieve. • Aislación térmica se ve disminuida.

Figura 13. Almacenaje integrado de biogás.

2.3. Tratamiento primario del biogás

El biogás producido contiene algunos componentes que pueden interferir con los equipos de generación. Tal es el caso del sulfuro de hidrógeno (H_2S), el cual, en contacto con el vapor de agua también contenido en el biogás, genera ácido sulfúrico (H_2SO_4), que tiene efectos corrosivos en los metales.

La presencia de vapor de agua en el biogás también puede interferir con la operación de los equipos de generación, comúnmente motores de combustión de ciclo Otto.

Los pasos para el tratamiento primario del biogás son, por tanto, tendientes a remover el sulfuro de hidrógeno y el vapor de agua del biogás. Para la remoción del sulfuro de hidrógeno se aplica comúnmente otro mecanismo microbiológico, el que consiste en la utilización de bacterias que son capaces de transformar el sulfuro de hidrógeno, en presencia de oxígeno, en azufre elemental. En numerosas plantas de escala pequeña a mediana (hasta 1 a 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 es difícil de regular y provoca algún grado de interferencia con el proceso de digestión anaerobia. La aireación excesiva del medio bacteriano puede provocar interferencias serias en el crecimiento y, en algunos casos, la perdida de viabilidad de la población metanogénica.

Para plantas más grandes se utiliza un reactor de desulfurización externo, el que elimina las desventajas anteriores, pero que lleva asociados mayores costos de inversión y operación y sólo se justifica para plantas de mayor producción. En caso de requerirse un biogás de mayor calidad, puede utilizarse la desulfuración química, aplicando sales de hierro o algunas soluciones básicas al biogás producido. En el caso de su aplicación en la zona gaseosa del digestor, tienen la ventaja de una menor intervención en el proceso anaerobio, pero la desventaja de la necesidad de aplicación de sustancias químicas, con sus consiguientes costos operacionales. También pueden utilizarse reactores externos de desulfurización química, pero estos equipos representan costos de inversión y operación mayores que sólo se justifican para plantas de mayor escala y de biogás de mayor calidad.

Respecto del secado, en general 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 ambiente y la longitud de las tuberías sea suficiente 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 agua desde donde será eliminada el agua acumulada.

En algunos casos puede ser necesaria la utilización de un pequeño intercambiador de calor para el enfriamiento de gases, el que reduce la temperatura del biogás separando el vapor de agua. En estos casos, se alcanza una mejor y más regulable calidad del biogás, lo que redunda en una mejor operación y necesidad de mantención del motor menor, pero que lleva asociados costos de operación algo mayores. El biogás pre-tratado ingresa a los equipos de generación a través de las tuberías de alimentación, previo paso por un compresor, que asegura la presión necesaria para la inyección del combustible en las cámaras de combustión del motor.

2.4. Utilización del biogás

La utilización energética del biogás producido ha sido el factor más importante en el desarrollo de esta tecnología en Europa. A través de la combustión de la fracción de metano contenida en el biogás se puede tanto generar energía térmica, como energía eléctrica, utilizando equipos de generación termo-eléctricos.

La alternativa más simple es la generación de calor a través de la combustión directa del biogás. En este caso, el calor generado puede utilizarse para fines productivos o para calefacción. El contenido energético del biogás varía de acuerdo a la fracción de metano contenida en él. A modo de comparación, se incluyen los valores del poder calorífico de distintos combustibles, incluyendo el biogás.

Tabla 10. Poder calorífico de diversos combustibles.

Combustible	MJ/m³	MJ/kg
Biogás	16,4 – 24,5	
Gas natural	32 – 42	
Metano	32,7	
Propano	83,2	
Carbón		27,0 – 32,7
Madera (seca)		14,4 – 15,8
Petróleo Diesel		35,6

En general, los equipos de co-generación más utilizados corresponden a los motores de combustión con grupo electrógeno y calderas de recuperación de calor incorporados.

En la actualidad, estos equipos se venden en forma modular en distintos tamaños y capacidades, como containers integrados instalables en cualquier planta de biogás y son fabricados por proveedores europeos y norteamericanos. 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, calderas de recuperación de calor, distribuidores de calor para calefacción y un tercer usuario, mueble de control, protecciones, etc.

Existen otras alternativas para la generación eléctrica a partir del biogás, como la utilización de microturbinas de gas o celdas de combustible, que hasta ahora no han tenido un desarrollo comercial mayor, principalmente debido a 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.

Fundamentalmente son dos las variantes más utilizadas para la generación de energía termo-eléctrica, las cuales se diferencian sólo en el tipo de motor empleado: motores a gas de combustión en ciclo Otto y motores con encendido diésel. En el caso de los motores a gas, la combustión se origina en la chispa producida por bujías eléctricas. En el caso de los motores con encendido diésel, se agrega en la cámara de combustión una pequeña parte de diésel (generalmente un 10%), que es el 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 emisión de gases. Las características de ambos tipos de motores pueden observarse en las Tablas 11 y Tabla 12.

Tabla 11. Características de los motores para biogás con encendido diésel.

Características	• Encendido mediante la adición de Diesel en la mezcla (hasta 10%). • Sistemas con potencias eléctricas de hasta 250 kW. • Vida útil de alrededor de 35.000 horas de operación. • Eficiencias eléctricas desde 35 a 3% (para potencias pequeñas cercanas a 30%). • Eficiencia térmica de 40 a 45%.
Áreas de aplicación	• Todo tipo de biogás, especialmente rentables en plantas pequeñas.
Ventajas	• Uso con bajos costos de inversión de motores standard (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 reduce grado de renovabilidad de la energía. • Mayores emisiones asociadas (NOx, SOx y material particulado). • Mayor necesidad de mantención por calcinamiento de inyectores.

Tabla 12. Características de los motores para biogás en ciclo Otto.

Características	• Operación en cuatro tiempos con encendido mediante bujías. • Sistemas con potencias eléctricas desde 200 kW hasta varios MW. • Vida útil de alrededor de 60.000 horas de operación. • Eficiencias eléctricas desde 30 a más de 42% (para potencias pequeñas cercanas a 30%). • Eficiencia térmica de 40 a 45%.
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 diésel. • Menor necesidad de mantención y mayor vida útil. • Eficiencia global mayor que lo motores con encendido diésel.
Desventajas	• Costos levemente mayores que los motores con encendido diésel • En rangos bajos de potencia presentan eficiencias menores que los motores de encendido diésel.

Las eficiencias eléctricas, en general, van desde 35% para potencias eléctricas bajas (entre 75 y 100 kW), hasta 42% para potencias eléctricas desde los 500 kW (Figura 14). Las eficiencias térmicas de este tipo de sistemas varían también en rangos similares, siendo las eficiencias globales de alrededor de 75% a 85%.

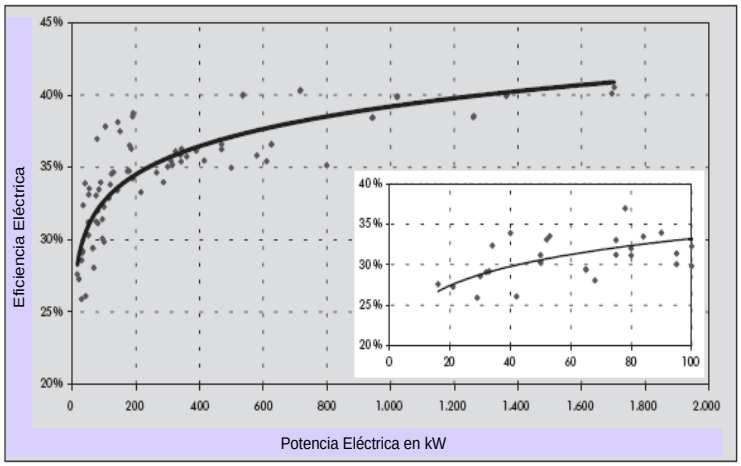

Figura 14. Eficiencia eléctrica de grupos generadores en base a biogás.

Para aquellas ocasiones en que los equipos de generación estén fuera de funcionamiento, se dispone de una antorcha de seguridad para la quema controlada del biogás. El arranque de la línea de gas alternativa hacia la antorcha debe localizarse entre el compresor y el motor, a fin de asegurar el flujo del biogás hasta la antorcha. En general, es conveniente diseñar tanto la antorcha como el compresor de biogás de manera que ambos puedan funcionar simultáneamente. Esto debido a que, en determinadas ocasiones, puede darse el caso de que, aun operando el motor a plena carga, se obtenga un aumento del biogás almacenado, producto de un alza en la producción de biogás (debido a, por ejemplo, un aumento inesperado de la calidad de la biomasa alimentado, o una mejora del proceso biológico no esperada). 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 casos eventuales.

Figura 15. Ejemplos de grupos generadores. (A) Grupo modular en container y (B) Grupo electrógeno en casa de máquinas.

2.5. Tratamiento y disposición de los lodos digeridos

Producto de la digestión anaerobia se genera una mezcla de agua y sólidos que se conoce como lodo. Esta mezcla está compuesta por materia no orgánica, materia orgánica no digerida y biomasa bacteriana. A fin de disponer de estos lodos, debe realizarse algún tipo de tratamiento previo. Los métodos o procesos que se emplean comúnmente para el tratamiento de los lodos, hasta su disposición final son:

- **Espesamiento**: consiste en concentrar los lodos.
- **Secado en lechos de arena**: consiste en la evaporación de una cantidad de agua tal que el lodo digerido pueda ser manejado como material sólido. Esto se lleva a cabo en lechos al aire libre diseñados para tal efecto.
- **Filtración**: consiste en la eliminación de agua de los lodos ya sea por filtro prensa o filtro de bandas.
- **Secado con calor**: consiste en la eliminación de agua por calor hasta un contenido de humedad del 10%.

Una vez tratados, se debe proceder a la disposición final de los lodos. Para ello, se dispone de las siguientes alternativas:

1. **Fertilizante o acondicionador de suelo**: se basa en las cualidades físicas y químicas del lodo obtenido luego de su estabilización por métodos anaerobio. En este contexto, los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas se pueden dividir en tres grupos:

- Hidrógeno, oxígeno y carbono, asegurados libremente a partir del aire y agua.
- Nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, y hierro, obtenidos en cantidades substanciales a partir del suelo.
- Boro, manganeso, zinc, cobre y otros elementos, disueltos en pequeñas cantidades en el suelo y que son conocidos como elementos trazas.

Los principales nutrientes fertilizantes son el nitrógeno, fósforo y potasio, y la cantidad que se requiere de cada uno de ellos dependerá del tipo de suelo, de las condiciones climatológicas y del cultivo. El lodo estabilizado anaerobiamente contiene cantidades importantes de los nutrientes mencionados. El humus del lodo, además de proporcionar alimento a los vegetales, beneficia el suelo aumentando su capacidad de retención de agua y mejorando su calidad para el cultivo. También disminuye el fenómeno de erosión. En el caso de tratarse desechos industriales, debe cuidarse que los contenidos de elementos trazas no se encuentran en cantidades demasiado elevadas, dado que altas concentraciones de ellos pueden ser perjudiciales para el ecosistema.

2. **Disposición en vertederos**: se ocupa principalmente para los lodos crudos. Estos se disponen en zanjas de 0,6 a 0,9 m de ancho de profundidad, cubriéndolos con una capa de 0,3 de tierra como mínimo.

3. **Material de relleno**: se limita casi exclusivamente a los lodos digeridos, los que pueden ser dispuestos en el medio ambiente sin generar olores ofensivos. Los lodos pueden estar mojados o parcialmente deshidratados para ser utilizados como relleno para terrenos bajos. Cuando se utilizan lodos mojados, la zona empleada se convierte en una laguna, lo que ha sido objeto de estudio como método de tratamiento. Por lo tanto, dependiendo del uso que se le dé a estas lagunas, este será un método de tratamiento o de disposición. Resulta económico utilizar lagunas como método de disposición final de lodos digeridos puesto que elimina el proceso de deshidratación. Sin embargo, este método sólo es utilizable en lugares donde existen zonas bajas desocupadas y disponibles en el lugar de la planta o a distancias razonables adonde puedan llegar los lodos por sistemas de tuberías. Este método se utiliza frecuentemente como sistema complementario cuando son inadecuados los lechos de secado. Las cenizas resultantes de la incineración de lodos también se utilizan como relleno, al igual que los lodos provenientes de los lechos secadores y de los filtros a vacío.

En caso de utilizarse los lodos como mejorador de suelos, sea a través de su disposición en campos propios o a través de su venta, deben considerarse las normativas relativas al uso de lodos en suelos. Algunas legislaciones, como la europea y la chilena, califican los lodos provenientes del tratamiento de residuos de acuerdo a su proveniencia en lodos tipo A y tipo B. Los lodos Clase A son aptos para cualquier uso agrícola (cultivos hortícolas, frutícolas, forraje, fibras, árboles frutales, praderas para pastoreo, jardines, parques, áreas verdes, cementerios, etc.), no así los lodos tipo B que dependiendo del cultivo podrán ser aplicados con restricciones.

Lodos **clase A** deberán cumplir todos los siguientes requisitos:

1. Tener una densidad de coliformes fecales menor a 1000 Número Más Probable (NMP) por gramo de lodos, base seca.
2. Tener una densidad de salmonella sp. menor a 3 NMP en 4 gramos de lodos, base seca.
3. El contenido de huevos de helmintos debe ser menor a 1 en 4 gramos de lodos, base seca.
4. Tener una densidad máxima de virus MS-2 menor a 1 Unidad de Formación de Placas (UFP) en 4 gramos de lodos, base seca.

De acuerdo a la norma queda prohibida la aplicación de lodos en suelos de uso agrícola, forestal o en jardines, cuando los análisis indiquen que los contenidos totales de metales pesados sobrepasan cualquiera de las concentraciones máximas señaladas en la Tabla .

Para la aplicación de lodos se considerarán los siguientes tipos de uso de suelo:

1. Suelos de uso agrícola y/o forestal, incluyendo suelos erosionados con potencial de uso agrícola inmediato;
2. Suelos dedicados a áreas verdes, recreacionales, parques, jardines, cementerios;
3. Suelos degradados sin potencial de uso agrícola inmediato.

Tabla 13. Concentraciones máximas de metales pesados en lodos de uso agrícola.

Metal Pesado	Concentración máxima en mg/kg de lodo (base seca)[1]
Arsénico	40
Cadmio	40
Cobre	1500
Mercurio	20
Níquel	420
Plomo	300
Selenio	100
Zinc	2800

De acuerdo a la norma se prohíbe la aplicación de lodos en:

1. Suelos de uso agrícola, forestal o jardines, cuyo pH sea inferior o igual a 5.
2. Suelos de textura arenosa, esto es, suelos cuyo porcentaje de partículas con diámetros entre 0,050 y 2 mm sea igual o superior a 30 y el porcentaje de arcilla o partículas menores a 0,002 mm de diámetro sea inferior a 10.
3. Suelos saturados con agua durante algún período del año, a manera de ejemplo: vegas, bofedales, ñadis.
4. Suelos cuya capa freática se encuentre a menos de 1 metro de profundidad y en aquellos suelos en los cuales se genere un efecto de napa colgante.
5. Áreas cubiertas con nieve.
6. Zonas de protección de fuentes de captación de agua potable, esto es, 300 metros aguas arriba para el caso de aguas superficiales y en un radio de 300 metros tratándose de fuentes de aguas subterráneas.

[1] Concentraciones expresadas como contenidos totales (sólidos totales)

7. Franjas de protección de ríos y lagos, esto es, a menos de 15 metros de sus riberas.
8. Suelos con riesgo de inundación.
9. Suelos con pendientes superiores a 15 %. Para pendientes mayores del 2%, se exigirá un acanalado paralelo al contorno de la pendiente para evitar la erosión.

Los lodos **clase B** se aplicarán según tipos de cultivo de acuerdo a lo siguiente:

1. En suelos destinados a cultivos hortícolas o frutícolas menores, que estén en contacto directo con el suelo y que se consuman normalmente sin proceso de cocción, los lodos deberán aplicarse con a lo menos 12 meses de antelación a la siembra.
2. No se podrá aplicar lodos en cultivos hortícolas ni frutícolas menores durante el período de crecimiento.
3. En praderas y cultivos forrajeros, podrá procederse al pastoreo o a la cosecha sólo transcurrido 30 días desde la última aplicación.
4. En suelos de uso forestal, la aplicación de lodos podrá efectuarse solo si se cuenta con un control de acceso durante los 30 días posteriores de la aplicación.

2.6. Problemas de operación

El riesgo de fallas asociado a este tipo de proyectos puede separarse entre problemas del proceso biológico y los riesgos de falla de los equipos en general. 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 importantes, como los equipos de co-generación, contar con contratos de mantención.

Un aspecto importante dice relación con la calidad del material de fabricación de los reactores. En general, debe asegurarse, además de la impermeabilidad de los reactores, una protección contra la corrosión suficiente frente al ataque de los ácidos, como el ácido sulfhídrico contenido en el biogás producido.

Desde el punto de vista del proceso microbiológico, los riesgos más importantes están asociados a la operación de estas plantas. 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 y las más sensibles a los cambios del medio.

En general, problemas que se presenten en el proceso biológico se verán reflejados tanto en la cantidad como en la composición del biogás producido, sea disminuyendo su cantidad y/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, lo que incrementa la acumulación de ácidos provenientes de las primeras etapas del proceso acelerándose así la reducción de la actividad metanogénica y, de no mediar una acción externa, provocando el cese total de la producción de metano. 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.

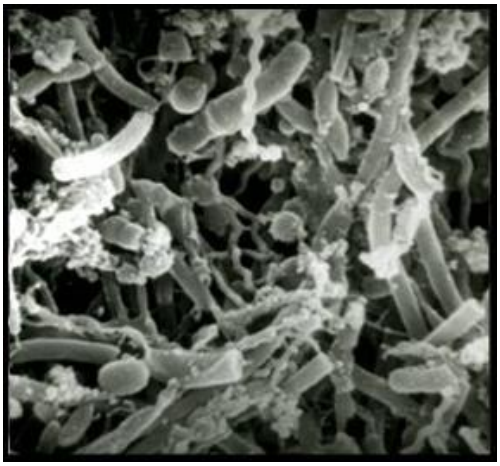

Figura 16. Micrografía de comunidad bacteriana anaerobia mediante SEM (X 5000).

Las principales causas de la acidificación del medio corresponden a:

a) **Sobrecarga hidráulica**: ésta 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.

b) **Sobrecarga orgánica**: ésta 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.

c) **Sobrecarga de tóxicos**: el proceso es sensible a una serie de compuestos tóxicos o inhibidores, entre los que se incluyen bactericidas, metales pesados, 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 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 mantener la temperatura en los rangos de operación óptimos. Para minimizar los riesgos de operación de estos sistemas, debe tenerse especial cuidado en el control de algunos parámetros, los 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 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 AGV en el interior del reactor y su control permite prevenir la acidificación del reactor, con la subsecuente disminución del pH y la actividad metanogénica.

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 de 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.

3. Principales tipos de reactores anaerobios

En general, se puede hablar de dos tipos de procesos que se han establecido en el mercado para el tratamiento de residuos orgánicos y/o aguas residuales domesticas, principalmente por su estabilidad y/o su simplicidad respecto de otros tipos de procesos: (i) reactores de mezcla completa y (ii) reactores de flujo pistón. La Figura 17 muestra esquemáticamente ambos tipos de reactores.

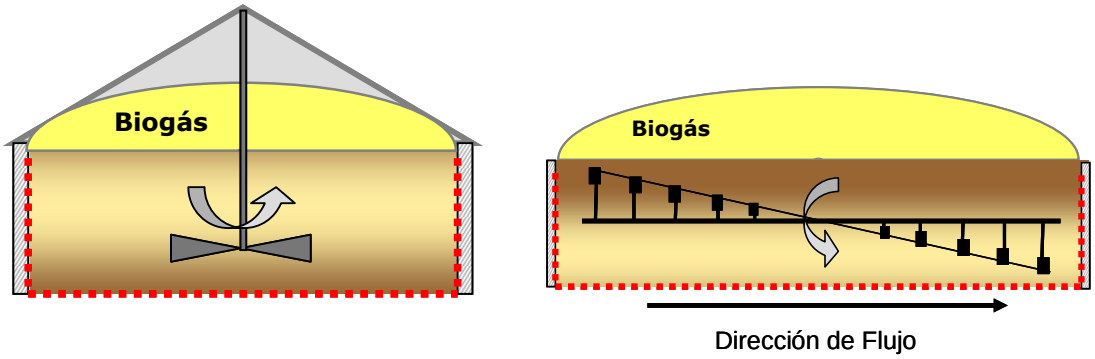

Figura 17. Tipos de reactores. (A) Reactor de mezcla completa y (B) reactor de flujo pistón.

3.1. El reactor de mezcla completa

El tipo de proceso más extendido corresponde a los reactores de mezcla completa. En este caso, se trata de reactores circulares cerrados, que pueden ser de acero u hormigón armado, en los que el sustrato es mezclado regularmente mediante agitadores (Figura 18). En estos reactores, los agitadores mantienen el régimen de mezcla completa permitiendo que el sustrato entrante entre en contacto con la población bacteriana y con el sustrato en degradación.

Figura 18. Ejemplos de reactores de mezcla completa.

En la Tabla 14 se muestran las principales características de este tipo de reactores:

Tabla 14. Características de los reactores de mezcla completa.

Características	• Reactores verticales de sección circular. • Construcción en acero u hormigón armado. • Volúmenes posibles sobre los 6000 m³. • Velocidades de carga apropiadas en el rango 2 a 3,5 kg SV/m³d.
Áreas de aplicación	• Para sustratos bombeables, con contenidos de sólidos medios/bajos a bajos (purines, mezclas de ensilajes con purines, restos pulposos, aguas residuales de alto contenido orgánico). • Apropiados para procesos continuos, discontinuos y cuasi-continuos.
Ventajas	• Costos de inversión comparativamente menores comparado con los reactores de flujo pistón. • 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.
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 capas duras flotantes.

3.2. El reactor de flujo pistón

Corresponde al otro tipo de reactores utilizado comercialmente. En este tipo de reactores se utiliza el empuje producido por la incorporación de nuevo material para generar el flujo longitudinal del material. La mezcla se produce generalmente en planos paralelos perpendiculares a la dirección de flujo a través de agitadores especiales.

El reactor de flujo pistón es apropiado para la digestión de sustratos con alto contenido de sólidos y puede presentar un proceso microbiológico más estable. El fundamento de estos reactores es que las etapas del proceso de digestión, si bien ocurren al interior del mismo reactor, ocurren a lo largo del flujo, concentrándose las primeras etapas del proceso en las áreas de entrada del sustrato y las etapas de acetogénesis y metanogénesis en las secciones cercanas a la salida del flujo. En la Tabla 15 se muestran las características generales para este tipo de reactores.

Figura 19. Ejemplos de reactores de flujo pistón.

Tabla 15. Características de los reactores de flujo pistón.

Características	• Reactores horizontales de secciones circular o cuadrada. • Construcción en acero u hormigón armado. • Volúmenes máximos posibles entre los 800 a 1000 m³. • Velocidades de carga apropiadas superiores a 5 kg SV/m³d. • Combinables con una segunda etapa de post-digestión en reactores de mezcla completa.
Áreas de aplicación	• Para sustratos bombeables, con contenidos de sólidos medios a medios/altos (mezclas de ensilajes con purines, restos pulposos, ensilaje de maíz). • Apropiados para procesos continuos y semi-continuos.
Ventajas	• Configuración compacta y de costos relativamente bajos para plantas pequeñas a medianas. • Separación de las etapas del proceso de digestión. • Prevención de formación de capas duras flotantes debido a su forma de construcción y agitación. • Prevención de flujos de corto circuito. • Requieren tiempos de retención hidráulicos menores. • Calefacción más efectiva debido a su forma compacta.
Desventajas	• Tamaños grandes requieren reactores paralelos. • Mantención de equipos internos requieren generalmente el vaciado del reactor.

3.3. El reactor de dos fases

Existen otros tipos de reactores, como los de dos fases en donde físicamente se separan las etapas de solubilización y metanización. El reactor utilizado para la segunda etapa es generalmente un reactor llamado de tipo granular, aptos para concentraciones de sólidos menores y en los que la mezcla se realiza a través del movimiento generado por las burbujas de biogás emanadas del sustrato mismo. Sin embargo, debido a que su construcción requiere generalmente un desarrollo de ingeniería y planificación a la medida, no ha existido hasta ahora un desarrollo comercial de mayor escala de este tipo de reactores.

En todos los casos debe considerarse la protección contra la corrosión del material del reactor, fundamentalmente en la zona de interfaz húmedo-gaseosa, esto es, sobre el nivel freático del reactor, sea 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 metanogénicas, debe considerarse tanto la calefacción del material dentro del reactor, como la aislación térmica del mismo.

Existen varios sistemas de calefacción que pueden utilizarse para mantener la temperatura del reactor (Figura 20). Uno de los más utilizados es el de superficies radiantes, que utiliza las paredes del reactor (hormigón armado) para el transporte de calor. Otro sistema utilizado comúnmente es la instalación de un serpentín radiador al interior de los reactores (acero u hormigón armado).

En ambos casos se utiliza agua caliente para el transporte producido de la biogás (motor de cogeneración o calefacción) hasta el reactor. Para calefaccionar el reactor puede utilizarse, tanto un sistema de calefacción integrado en las paredes del reactor (muro radiante), como un sistema de serpentín interno adosado a las paredes del reactor.

Figura 20. Sistemas de Calefacción de Digestores. (A) Calefacción con serpentín interno y (B) Calefacción por muro radiante.

3.4. El reactor UASB

El reactor UASB (upflow anaerobic sludge blanquet, flujo ascendente a través de un manto de lodos, Figura 21) ha significado un avance importante para el desarrollo de la digestión anaerobia. Su simpleza de construcción y operación, las altas velocidades de carga orgánica que es capaz de tratar y sus bajos costos de operación lo han transformado por lejos en una alternativa anaerobia muy utilizada y exitosa. Una de las razones de este éxito es la utilización de lodo granular, el cual se caracteriza por su elevada actividad y alta velocidad de sedimentación, permitiendo mantener altas concentraciones de biomasa en los reactores, sin la utilización de soportes o pasos posteriores de separación.

Los digestores UASB han demostrado a escala de laboratorio, piloto e industrial que constituyen una alternativa confiable y económica al pensar en tratamiento de aguas residuales de mediana y alta carga. Sólo existen algunas dudas respecto de su utilización para el tratamiento de aguas muy diluidas (DQO < 1000 mg/L), por problemas de afinidad y transferencia de masa.

Con el fin de ampliar el campo de acción de la digestión anaerobia hacia el tratamiento de aguas residuales de baja concentración se han desarrollado nuevas tecnologías, como el reactor anaerobio granular de lecho expandido (expanded granular sludge bed, EGSB). Este reactor opera con una alta velocidad superficial, lo que promueve un mejor contacto entre el agua residual y el lodo anaerobio, disminuyendo los problemas de transferencia de masa.

Los reactores EGSB, que se encuentran operando en la actualidad lo hacen principalmente con aguas residuales de mediana y alta carga, no existiendo aplicaciones a escala real con efluentes de menos de 2000 mg DQO/L.

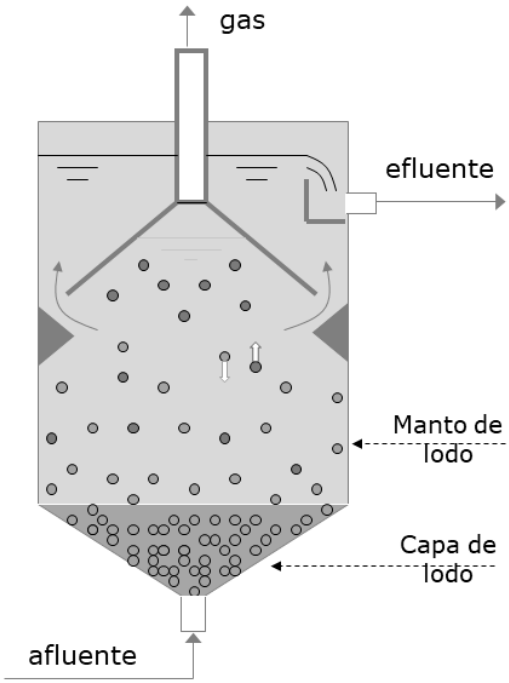

Figura 21. Esquema simplificado de un reactor UASB.

4. Principales parámetros de operación

A fin de controlar la actividad microbiológica y las condiciones ambientales en los reactores de digestión anaerobia, existen diversos parámetros de operación que permiten manejar el proceso y controlar las reacciones que se producen al interior del reactor.

Concentración de oxígeno

Las bacterias metanogénicas son anaerobias estrictas, es decir, el oxígeno para ellas constituye un elemento tóxico. No obstante, dado que en general todos los procesos se realizan en un solo reactor y las poblaciones bacterianas encargadas de las distintas etapas cohabitan, en caso de producirse ingreso de oxígeno al reactor, éste puede ser consumido por las bacterias hidrolíticas y acidogénicas ya que éstas son anaerobias facultativas (pueden crecer en presencia o ausencia de oxígeno).

De todas formas, debe cuidarse la no inclusión o la inclusión muy menor de oxígeno en el ambiente de los reactores a fin de no poner en peligro la población de bacterias metanogénicas. Si es necesario adicionar pequeñas dosis de aire para la desulfurización, ésta debe ser muy controlada para evitar la presencia de oxígeno en el medio líquido.

Temperatura

Este factor es crucial para asegurar la eficiencia del proceso de degradación de la materia orgánica. Las bacterias metanogénicas involucradas en el proceso de descomposición presentan diferentes velocidades de degradación de la materia orgánica en función de la temperatura.

Dependiendo del rango de temperatura en el que las bacterias se desarrollen se distingue entre:

- bacterias psicrofílicas (hasta los 25°C, bajo grado de actividad metanogénica)
- bacterias mesofílicas (32 a 42 °C, grado de actividad mediano)
- bacterias termofílicas (50 a 57 °C, grado de actividad alto)

En general, las plantas productoras de biogás trabajan en el rango mesofílico, dado que en el rango termofilico, si bien se tiene una mayor actividad microbiana, el gasto energético es notablemente mayor en comparación con el rango mesofílico.

pH

El control de este parámetro resulta, muy importante ya que el proceso de degradación anaerobia de la materia orgánica debe realizarse entre un rango de pH entre 6,8 y 7,5. Esto está determinado dado que las bacterias acetogénicas y metanogénicas, quienes regulan el proceso, son muy sensibles a altos valores de acidez lo que a su vez genera una disminución en el pH. Un pH menor a 6,5 implica acidificación del reactor y, por tanto, una inhibición de las bacterias metanogénicas. Sin embargo las bacterias encargadas de las etapas de hidrólisis y acidogénesis prensen tan alta actividad en medios más ácidos, con un pH óptimo entre 4,5 y 6,3, por lo que un reactor a ese pH logrará una solubilización de la materia orgánica pero no una metanización.

Nutrientes y compuestos inhibidores

Adicionalmente a la materia orgánica que es degradada por las bacterias, éstas requieren otros nutrientes para su desarrollo. La relación C:N:P:S debiera establecerse alrededor de 600:15:5:1, a fin de proveer a los microorganismos de las condiciones adecuadas para su desarrollo. Una carencia en un nutriente puede provocar una disminución en la actividad microbiana y, por ende, en la velocidad de producción de metano. Las concentraciones de posibles compuestos inhibidores son también un factor importante para la estabilidad del proceso. Respecto de inhibidores, deben considerarse la presencia de compuestos como metales pesados, amoníaco, pesticidas, sanitizantes, antibióticos u otros compuestos.

Carga orgánica volumétrica, OLR

Este parámetro indica la cantidad de materia orgánica que puede tratar el reactor por unidad de volumen. Considerando que la carga orgánica es el producto del caudal por la concentración de la materia orgánica expresada en DQO, la OLR puede definirse como:

$$OLR = \frac{kg\ DQO}{m^3} \tag{1}$$

Velocidad de carga orgánica, VCO

Este parámetro indica la cantidad de materia orgánica con que se alimenta el reactor, por unidad de tiempo (día) y por unidad de volumen del reactor. Considerando que el parámetro Sólidos Volátiles (SV) equivale a la materia orgánica contenida en un sustrato, la VCO puede definirse como:

$$VCO = \frac{kg\ SV}{m^3 \cdot d} \tag{2}$$

Al fijar el valor de la VCO y conociendo la cantidad y composición del sustrato disponible puede calcularse el volumen de reactor requerido para asegurar la estabilidad del proceso. Una sobrecarga del reactor (VCO alta) puede producir un exceso de producción de ácidos en las primeras etapas del proceso, lo que puede provocar la inhibición parcial o total de la actividad metanogénica.

Tiempo de residencia hidráulico, TRH

Este parámetro indica la cantidad de tiempo promedio que los sustratos permanecen en el reactor, cuando se tienen procesos de flujo continuo. En general el sustrato está en condiciones de humedad que permite asumir aditividad de los volúmenes y, por tanto, el tiempo de retención hidráulico puede definirse como:

$$TRH = \frac{V}{Q_E} \tag{3}$$

Donde V es el volumen neto del reactor (en m^3) y Q_E el caudal volumétrico de entrada (en m^3/d). En general, si la degradación ocurre en un proceso por lotes, durante los primeros 20 a 30 días se degrada la mayor cantidad de materia orgánica. A partir de ahí, la degradación decae asintóticamente hasta un valor máximo para cada tipo de sustrato.

Para el caso de residuos sólidos orgánicos agroindustriales y estiércol de animales en general los reactores se diseñan para tiempos de residencia mayores de 16 a 25 días.

Grado de mezcla del reactor

La actividad biológica depende fuertemente del contacto que tengan los microorganismos con la materia orgánica contenida en el sustrato. Por esta razón, debe asegurarse una mezcla suficiente del sustrato recién ingresado con el sustrato ya parcialmente digerido, que contiene la población bacteriana. Para asegurar una mezcla suficiente y evitar la separación de las poblaciones bacterianas, la práctica común es utilizar agitadores de rotación lenta y mezclas discontinuas a intervalos de tiempo. También puede realizarse una agitación local que provoque la mezcla lenta del sustrato en el reactor a través de la generación de corrientes de flujo (uso de agitadores de propela). En general la mezcla no es intensiva pero si lo suficiente para asegurar la mezcla completa.

Potencial bioquímico de metano, PBM

El potencial bioquímico de metano (PBM) o también simplificado como BMP por sus siglas en ingles es una medición rápida de bajo costo y se aplica principalmente a sustratos sólidos y tiene los siguientes objetivos:

- Calcular la biodegradabilidad anaerobia y la máxima producción de CH_4 de residuos orgánicos.
- Identificar el potencial de producción de energía de un sustrato.
- Seleccionar inóculos a fin de conocer su capacidad de adaptación o inhibición frente al sustrato.
- Predecir el funcionamiento de digestores a escala real.
- Evaluar el efecto de la co-digestión de diferentes sustratos.

El método del PBM consiste en emplear uno o varios sustratos (que pueden estar en forma líquida o sólida) y adicionar un inóculo activo bajo condiciones operacionales definidas, para medir la producción de CH_4, mediante cualquiera de los diferentes métodos (método manométrico, volumétrico o de cromatografía de gases). Las unidades en las que se reportan los valores del PBM son:

$$PMB = \frac{gDQO_{CH4}}{gSV \cdot d} \quad (4)$$

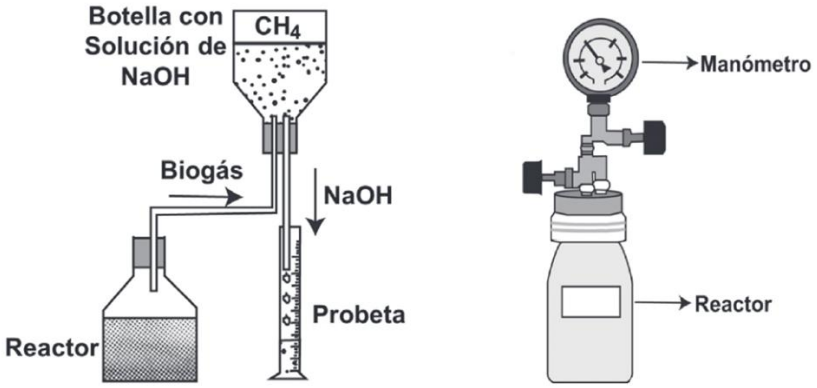

Figura 22. Esquemas de la medición volumétrica y manométrica del Potencial bioquímico de metano (PBM).

Actividad metanogénica específica, AME

La Actividad Metanogénica Específica (AME) o también simplificado como SMA por sus siglas en inglés (Specific Methanogenic Activity) se aplica principalmente en el tratamiento de aguas residuales y consiste en cuantificar la máxima capacidad de producción de metano por el grupo de microorganismos presente en lodos anaerobios.

La AME es una herramienta que evalúa el comportamiento de la biomasa contaminada y determina la carga orgánica máxima que puede aplicarse a un reactor, con el fin de examinar la biodegradabilidad de los sustratos y la posibilidad de selección de inóculos. Se recomienda que el inóculo sea caracterizado previamente en términos de los Sólidos Volátiles Totales (g SVT/L). El volumen de lodo a adicionar se calcula considerando que la mezcla de inóculo y sustrato no debe sobrepasar el 90% del volumen útil del reactor batch biológico.

El volumen del lodo a inocular puede calcularse con la ecuación 5:

$$V_L = \frac{V_t \cdot C}{C_i} \tag{5}$$

en donde, V_L es el volumen de lodo a adicionar en el reactor en litros, V_t es el volumen total en el reactor (volumen del lodo V_L más volumen de sustrato), C es la concentración establecida de lodo en términos de SVT en el volumen total en g SVT/L y C_i es la concentración inicial del lodo en g/L.

El ensayo de AME debe ser realizado utilizando sustrato (agua residual) y nutrientes en exceso para lograr que la cinética de degradación dependa principalmente de la concentración de microorganismos presentes en el inóculo y no de la cantidad de sustrato y/o nutrientes.

Se recomienda preparar un blanco en el cual el sustrato es reemplazado por un medio artificial (preparado en el laboratorio y consiste en una mezcla de ácidos grasos volátiles comúnmente constituida por acetato, propionato y butirato en un concentración similar del agua residual a evaluar). Para el ensayo se observa el mismo esquema que el del ensayo de BMP. La Tabla 16 muestra los componentes de la solución de reserva de nutrientes [3].

Figura 23. Ejemplo de un ensayo AME.

Tabla 16. Composición de solución de nutrientes recomendados para el ensayo AME.

Solución	Compuesto	Unidades	Concentración
Macronutrientes	NH_4Cl	g/L	170
	$NaHCO_3$	mg/L	1000
	KH_2PO_4	g/L	37
	$MgSO_4.4H_2O$	g/L	9,0
	$CaCl_2.2H_2O$	g/L	8,0
Micronutrientes	$FeCl_3.6H_2O$	mg/L	2000
	$ZnCl_2$	mg/L	50
	$CuCl_2.2H_2O$	mg/L	30
	$MnCl_2.4H_2O$	mg/L	500
	$(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$	mg/L	90
	$AlCl_3.6H_2O$	mg/L	50
	$CoCl_2.6H_2O$	mg/L	2000
	$NiCl_2.6H_2O$	mg/L	50
	H_3BO_3	mg/L	50
	$Na_2SeO_3.5H_2O$	mg/L	100
	EDTA	mg/L	1000
	HCl 36% (1)	mg/L	1,0
	Indicador de Potencial Redox RESAZURIN (2)	mg/L	500
Otros	Agente Reductor $NaS{\cdot}7H_2O$ (3)	mg/L	100
	Extracto de levadura (fuente de vitaminas) (4)	g/L	0,2

en donde, (1) al momento de utilizar las soluciones, adicionar 1 mL de esta solución por cada litro de la solución de macronutrientes, (2) evita formación de precipitados, (3) una vez se adicione el agente reductor, verificar la coloración final. Incoloro = bajo potencial redox; Rosa o Rojo = alto potencial redox. Rango recomendado: pE = -100 a -200 mV y (4) adicionar 0.2 g levadura/L al sustrato

La Figura 24 muestra un esquema de la curva teórica con el punto de medición de la pendiente. Para el cálculo de la pendiente deberá construirse una curva de "Volumen acumulado de metano" versus "Tiempo de incubación", este último podrá ser suspendido una vez la curva se torne asintótica. La pendiente deberá ser tomada en el tramo de mayor inclinación de la curva y deberá corresponder a la utilización de al menos el 50% del sustrato adicionado.

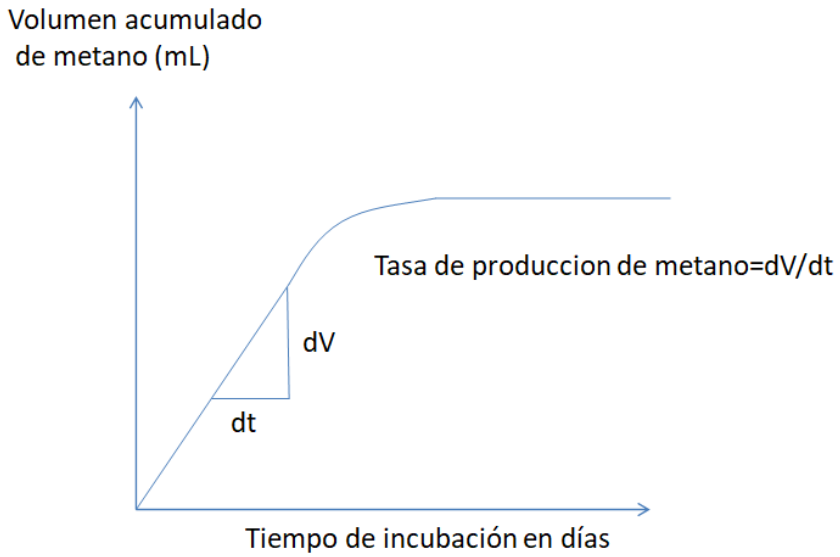

Figura 24. Curva de producción acumulada de CH_4

Los ensayos de AME se utilizan para la caracterización de lodos en reactores anaerobios. Usualmente se aplican para conocer la biodegradabilidad de diferentes sustratos o la selección de inóculos para el arranque de reactores anaerobios. Las unidades en las que se reportan los valores de la AME son:

$$AME = \frac{mL_{CH_4}}{gSV \cdot d} \quad (6)$$

5. Consideraciones para los análisis de rentabilidad

5.1. Costos de inversión, operación y mantenimiento

Dependiendo de su complejidad y el grado de automatización requerido, las plantas de biogás tiene requerimientos de equipos y maquinaria que, en general, debe ser importada a los países de Iberoamérica, puesto que su fabricación o montaje en dichos países es prácticamente inexistente. Sin embargo, gran parte de las inversiones corresponden a construcciones y trabajos que son realizados localmente.

Debido a la escasa experiencia en Iberoamérica en la construcción de este tipo de plantas, se presentan en este capítulo cifras respecto de los costos de equipos y obras solamente referenciales, que pretenden dar una idea aproximativa de los costos involucrados en este tipo de instalaciones, a fin de posibilitar una evaluación preliminar de proyectos.

Dada la amplia experiencia que existe en el desarrollo y oferta de equipos para plantas de biogás en Europa, especialmente en Alemania, se ha utilizado la información sobre precios de maquinarias y equipos que haya sido extraída de dichos mercados internacionales. Respecto de las obras civiles, se consideran precios y tarifas conocidas del mercado de la construcción chileno, tomado a modo de ejemplo de un país iberoamericano. Igualmente, para la estimación de costos de inversión y mantenimiento se ha considerado un diseño de plantas adaptado a las exigencias chilenas, tanto desde el punto de vista legal, como de mercado.

5.1.1. Costos de inversión

Debido a que el diseño y la tecnología empleada para una planta de biogás depende fuertemente tanto de las características de los sustratos a emplear, como de las condiciones físicas del terreno (disponibilidad de espacio, clima, etc.), es muy difícil entregar valores aproximados para los costos de inversión totales de este tipo de instalaciones. Sin embargo, a partir de la experiencia en diversos países con algunos tipos de plantas, y tomando en consideración las condiciones locales en Chile respecto de costos laborales, de construcción y de equipos, puede entregarse una primera aproximación para los costos de inversión de plantas de biogás de 500 kW de potencia eléctrica instalada de entre 2000 y 3000 €/kW instalado, sin considerar las inversiones necesarias para la utilización de calor.

Estas últimas deben ser examinadas en cada caso, dado que los montos involucrados dependerán fuertemente de las condiciones particulares del proyecto.

En general, los costos de inversión de una planta de biogás pueden dividirse en tres grupos, dependiendo de su naturaleza:

1. **Costos relacionados con la obras civiles**
2. **Costos de equipos y materiales – Mercado nacional**
3. **Costos de equipos – Mercado internacional**

Obras civiles

Respecto de las obras civiles, éstas corresponden fundamentalmente a la construcción de tanques, fosos de recepción, casa de máquinas y oficinas, así como a las labores de movimientos de tierra e instalación de faena. Los costos asociados a las obras civiles representan entre un 30 y un 50% del costo total de una planta de biogás, valor que depende de los tipos de materiales utilizados, así como la disponibilidad de espacio, del lay-out proyectado, el tipo de tecnología elegido, etc.

Equipos y materiales – Mercado nacional

En este grupo se incluyen todos los equipos que típicamente se encuentran en el mercado nacional (sean de fabricación nacional o importados) y cuyo precio está generalmente dado por las características del mercado interno y no por los precios internacionales. Este grupo está compuesto por bombas centrífugas, equipos eléctricos simples, materiales como tuberías de acero inoxidable o HDPE, PVC, materiales para aislación térmica, etc. En términos generales, este tipo de costos puede corresponder entre un 10 y un 25% del total de los costos de inversión.

Equipos y materiales – Mercado internacional

En este grupo se consideran todos aquellos equipos de fabricación extranjera, cuyo precio está regido por la demanda internacional o que por su desarrollo y fabricación corresponde a equipamiento especializado o altamente especializado. En este grupo se incluyen los equipos de generación aptos para el uso con biogás, los agitadores, los instrumentos de medición, equipos de control y automatización, etc.

Los costos relacionados a este grupo pueden alcanzar entre un 30 y un 45% de los costos totales de inversión para una planta de biogás.

5.1.2. Costos de operación

Los aspectos más importantes para considerar respecto a los costos de operación corresponden a:

1. **Energía utilizada por la planta**
2. **Personal**
3. **Disposición de residuos**

Energía utilizada en la planta

Respecto de la energía utilizada por la planta, esta dependerá del grado de automatización y de las tecnologías seleccionadas, fundamentalmente para los agitadores y bombas. En general, de acuerdo a la experiencia recopilada en las plantas de biogás existentes en Europa, especialmente en Alemania, se considera que la demanda eléctrica propia corresponde a 5-15% de la producción de energía de la planta. La demanda de energía térmica para calefacción dependerá de las condiciones climáticas del sitio de emplazamiento de la planta, así como del aislamiento térmico utilizado. Esta demanda puede alcanzar valores entre 5-35% de la energía térmica producida.

Personal

Dependiendo del grado de automatización de la planta será necesario contar con determinada cantidad de personal. En general, las labores principales que deben cubrirse son la recepción de material para la planta, control y supervisión, carga y despacho de lodos y labores administrativas. De acuerdo a la experiencia europea, los requerimientos de personal para una planta de 500 kW consisten en una persona con nivel técnico en jornada completa más un ayudante en jornada completa a parcial. En general, puede considerarse un volumen de Horas-Hombre de entre 2000 y 3000 HH/a, dependiendo del grado de automatización de la planta, la frecuencia de recepción de sustratos y de disposición de residuos. En las plantas grandes por la digestión de desechos orgánicos de más de 10000 toneladas por año podrían trabajar más de 10 personas.

Disposición de residuos

En general, el residuo producido por las plantas de biogás, esto es, el lodo digerido, puede ser utilizado como mejorador de suelo y abono líquido. Sin embargo, en caso de que no se cumplan las condiciones necesarias para el uso de los lodos en fertilización, debe considerarse la disposición de estos residuos de la manera que la legislación lo indica. En tal caso, debe consultarse directamente con empresas de residuos en la zona del proyecto, dado que los costos de disposición muestran una gran variabilidad local.

5.1.3. Costos de mantenimiento

Los costos de mantenimiento de una planta de biogás se concentran, fundamentalmente en la mantención de los equipos especializados. Normalmente, para equipos complejos como grupos electrógenos o filtros de banda o de prensa, es conveniente cerrar contratos de mantenimiento con la empresa proveedora del equipo o sus representantes en el país. En el caso de los grupos electrógenos modulares, es común contar con contratos de mantención que garanticen una cierta disponibilidad del equipo (por ejemplo 90%) y con precios que van entre los 1,0 a 3,5 EuroCent/kWhel. En algunos casos, los contratos consideran un servicio de emergencia de 7 días por semanas. En tales casos, los costos se encuentran en parte más alta del rango de valores entregado. Para contratos de mantención sin servicio de emergencia, los valores a considerar son menores.

Otra posibilidad para disminuir los costos de mantención es la realización de algunas tareas simples de la mantención (cambios de aceite, bujías, etc) con personal propio. La desventaja que presenta este forma de mantenimiento, es que la empresa prestadora de servicios más complejos (cambios de filtros, ajustes de motor, recambios importantes, etc), en general, no ofrecerá garantías de funcionamiento, aduciendo que no tiene el control sobre las actividades de mantención que realiza el operador de la planta. Los costos para otro tipo de equipos, como filtros, bombas de cavidad progresiva, agitadores, sistema de transporte de material (tornillos sin fin), etc, pueden estimarse en un 5-10% del valor de la inversión.

Otros costos importantes a considerar corresponden a los costos asociados a la administración de la planta y a los seguros involucrados. Respecto de las labores administrativas, éstas corresponden a alrededor de un 10% del tiempo de trabajo total, es decir, entre 200 y 300 HH/a. En el caso europeo, los costos de seguros pueden estimarse entre 1,5 y 3% de las inversiones totales.

6. Planificación de un proyecto de biogás

Para la realización de cualquier proyecto, en particular para proyectos de biogás, es necesario realizar actividades que permitan tomar decisiones respecto, tanto de su desarrollo y forma de ejecución, como de todas sus características, así como recabar información importante para reducir los riesgos del proyecto en cuestión.

En este sentido, se presentan a continuación algunos consejos prácticos para el desarrollo de un proyecto de biogás, inmersos dentro del ciclo de desarrollo que sigue todo proyecto en general y que dan cuenta de las particularidades de los proyectos de generación eléctrica a partir de la digestión anaerobia de desechos orgánicos y otras biomasas.

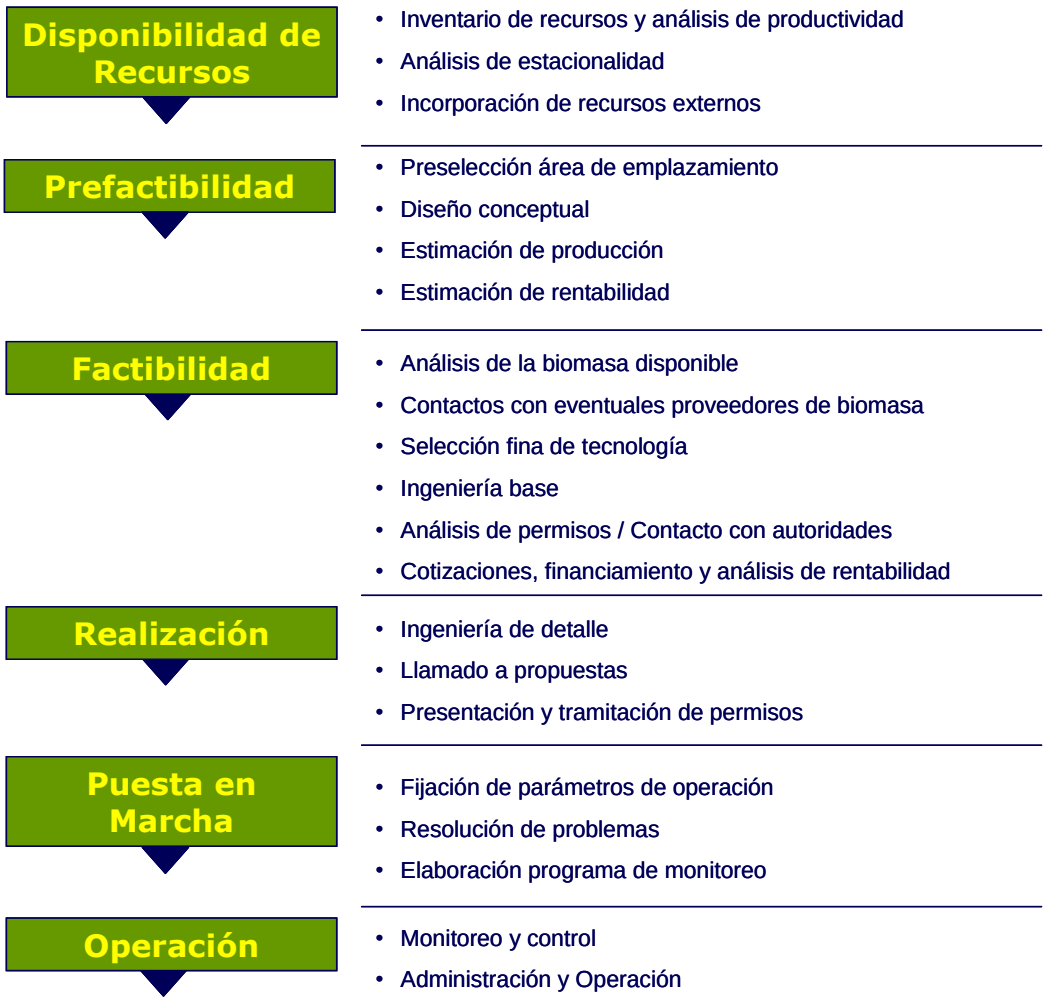

Figura 25. Esquema del ciclo de desarrollo de un proyecto de biogás.

6.1. Primer paso: estimación del potencial

Esta primera etapa consiste en la prospección de los recursos disponibles para la generación de biogás. En caso que se trate de recursos propios, como es el caso de industrias con altas cantidades de residuos orgánicos, la primera actividad debe concentrarse en la recopilación de información respecto de sus residuos. Para casos de desarrolladores de proyecto independientes, puede buscarse zonas en las que se concentren industrias con altas cantidades de residuos generados e intentar obtener información respecto de dichos residuos.

En general, es importante obtener información respecto a:

- **Tipos de residuos**: debe describirse claramente qué tipos de residuos se dispone (por ejemplo, restos de frutas por tipo, hortalizas, orujos, etc.)
- **Cantidades**: para cada tipo de residuo especificado, debe hacerse un levantamiento de las cantidades generadas por mes. Conviene expresar las cantidades en términos de toneladas de masa fresca.
- **Características de los residuos**: en general, es conveniente tener una idea de la cantidad de humedad contenida en los residuos. La información contenida en esta guía respecto de los tipos de biomasas y sus características principales puede ser utilizada para una evaluación rápida del potencial propio. En etapas posteriores, o para una evaluación más acuciosa, es necesario realizar ensayos más formales para determinar las características específicas de la biomasa disponible.
- **Estacionalidad**: debe determinarse los períodos en los que se producen determinadas cantidades de residuos. Una marcada variación estacional en la producción de residuos puede significar una imitante importante para el desarrollo de proyectos de biogás.

Con esta información, y utilizando factores de conversión incluidos en esta Guía, se puede obtener una visión preliminar de la cantidad de energía que se puede generar, así como de las dimensiones que tendrá el proyecto.

6.2. Pre-factibilidad: emplazamiento, selección de tecnología y diseño conceptual

En una primera etapa deben realizarse una evaluación de sitios disponibles para el emplazamiento de la planta. Los criterios fundamentales para una preselección corresponden a:

- Disponibilidad de espacio
- Accesibilidad vial
- Cercanía relativa a los puntos productores de la biomasa
- Precio de los terrenos
- Posibilidades de uso de calor
- Accesibilidad a la red eléctrica

En base a la información recopilada respecto de los recursos disponibles, debe determinarse conceptualmente el tipo de planta a construir. Los parámetros más importantes que deben determinarse son:

- Sistema de digestión
- Volumen total de los digestores
- Volumen total para tanques de almacenamiento de lodos
- Capacidad del calefacción o grupo de cogeneración (en kW eléctricos)
- Tipos de tecnología aplicables y capacidad necesarias para almacenaje y alimentación (Silo transitable, tanques de concreto, bombas para sustrato, bombas con picador, contenedor integrado de alimentación).

Para el diseño conceptual pueden utilizarse los parámetros e informaciones incluidas en esta guía. Para la estimación de la capacidad de los digestores es conveniente tener en cuenta no sobrepasar la velocidad de carga orgánica recomendada en este manual.

Para estimar la capacidad del grupo de cogeneración puede utilizarse la información incluida en esta guía respecto del rendimiento de biogás y su concentración de metano para los distintos sustratos.

Una vez realizado el diseño conceptual, pueden determinarse los requerimientos específicos de espacio de la planta y hacer una selección más fina de sitios apropiados para el emplazamiento. En esta etapa debe verificarse que no existan impedimentos legales o técnicos para la construcción de la planta en algún sitio determinado. Para ello es conveniente determinar el uso de suelo permitido en los sitios preseleccionados para descartar aquellos que no sean viables.

La estimación preliminar de la energía generada puede determinarse en función de los parámetros de grupos electrógenos incluidos en esta guía. Con la información conceptual de la planta puede tenerse una primera aproximación de sus costos. Utilizando el diseño conceptual en conjunto con la información respecto de costos e ingresos puede hacerse una primera evaluación económica del proyecto, tendiente a develar su potencial económico. En caso de obtenerse una evaluación positiva, de acuerdo con los criterios de evaluación propios, debe profundizarse el análisis, a fin de minimizar los riesgos de la inversión.

6.3. Factibilidad: análisis del sustrato e ingeniería base

Si el análisis preliminar del proyecto muestra un potencial económico interesante, debe darse paso a un análisis de factibilidad técnico-económica con mayor grado de detalle A fin de y minimizar los riesgos de inversión. En una primera fase, debe realizarse un análisis de degradación en laboratorio de los sustratos disponibles. En laboratorio deberá determinarse:

- Contenido total de Sólidos
- Contenido de materia orgánica (Sólidos Volátiles)
- pH
- Contenido de grasas, proteínas y carbonos hidraticos
- Nutrientes
- Grado de degradabilidad

- Velocidad de degradación
- Rendimiento de biogás
- Concentración de metano

Para este análisis, es conveniente tomar muestras representativas de los distintos tipos de sustrato, a fin de conocer las características de cada tipo particular. De esta forma, pueden hacerse cálculos y proyecciones de productividad para distintas combinaciones posibles de sustratos, dependiendo de su disponibilidad. En una segunda etapa, una vez ajustado el diseño conceptual a las condiciones reales del sustrato disponible, debe realizarse la ingeniería base, a fin de determinar los costos de inversión y operación con un mayor grado de certeza. Por otra parte, la determinación de los ingresos relativos al proyecto por concepto de venta de electricidad, calor, abono y, eventualmente de disposición de residuos (o ahorro de costos por disposición de residuos) debe realizarse con la nueva información recopilada y analizada previamente. En tercer lugar, debe concretizarse la selección del lugar de emplazamiento, optimizando las condiciones de venta de calor, costos de conexión, precio del terreno y transporte de la biomasa.

Otra actividad que debe profundizarse es el análisis para la determinación de los ingresos. En esta etapa, debe realizarse un análisis detallado de los modelos de negocios que pueden aplicarse para la venta de la energía producida, así como un análisis de la factibilidad de generar certificados de reducción de emisiones de CO_2 y sus valores de mercado. También deben considerarse en esta fase los ingresos o ahorro de costos por disposición de residuos.

También es importante en esta etapa iniciar las conversaciones formales con eventuales proveedores de sustrato. De esta forma podrá tenerse información suficiente para determinar la disponibilidad de material para la producción de biogás y la seguridad de abastecimiento.

Por último, deben considerarse los permisos necesarios para la construcción y operación de la planta. Deben considerarse las exigencias relativas a los permisos ambientales, así como otras consideraciones, como un eventual uso de suelo no permitido, presencia de áreas protegidas, exigencias para la disposición de lodos, etc. Deben tenerse en cuenta tanto los tiempos que demoran dichos permisos, como los costos involucrados en su obtención.

En esta etapa, es conveniente consultar con las autoridades correspondientes respecto de experiencias anteriores en proyectos o en temas similares (tratamiento de residuos, grupos de generación, etc.), a fin de intercambiar opiniones e incorporar al proyecto eventuales exigencias de las autoridades para el cumplimento de las normas, en etapas primeras del desarrollo. En esta etapa, y cuando ya se tengan los parámetros de diseño más importante, es conveniente comenzar el proceso de conexión a la red. Para la toma de decisiones en esta fase de desarrollo, es recomendable buscar la asesoría de especialistas en el área, independientes de los proveedores de tecnologías, que sean capaces de entregar información y criterios apropiados para la selección final de tecnologías en base a los requerimientos técnicos del proyecto.

6.4. Realización del proyecto

Dos de las actividades importantes de esta etapa corresponde a la fijación de las características definitivas de la planta, reflejadas en los proyectos de ingeniería de detalle y construcción y la selección de los proveedores de tecnología. Dado que, en general, no existen en Iberoamérica proveedores integrados de plantas de biogás, es posible que el diseño final requiera de la participación de distintas empresas de ingeniería y construcción, así como de distintos proveedores de equipos. Por ello es importante mantener un flujo de información entre las empresas participantes, a través de reuniones conjuntas de planificación y de evaluación de los progresos.

Tanto en la etapa de diseño, como durante el llamado a propuesta y la evaluación de las mismas, es conveniente contar con asesoría especializada, capaz de evaluar dichas ofertas, tanto desde la perspectiva de su coherencia técnica, como de su completitud. En ocasiones, propuestas que por sus bajos costos parecen a primera vista muy atractivas, pueden estar basadas en supuestos de diseño incorrectos o considerar sólo una parte de los equipos y obras, dejando de lado otras actividades cuyos costos pueden ser no despreciables. Durante la etapa de construcción, deben tomarse medidas para el aseguramiento de la calidad de las obras y montaje de equipos. La inclusión de un Libro de Obra, de uso obligatorio en el que se incluyan de forma obligatoria todas las modificaciones al proyecto original y las decisiones tomadas durante la construcción es imprescindible para una eventual solución de eventuales problemas y conflictos posteriores. Respecto a los equipos, debe ponerse cuidado en la garantía ofrecida por los proveedores, así como de las posibilidades de contratos de mantención por parte de los mismos o empresas asociadas.

6.5. Puesta en marcha y operación de la planta

En la etapa de marcha blanca del proyecto, deben ajustarse los rangos de valores para los parámetros de operación de la planta, a fin de obtener un proceso biológico estable, en el que tanto la producción de biogás, como la concentración de metano del mismo no presenten oscilaciones importantes. Los parámetros que deberán fijarse están descritos en esta guía y corresponden fundamentalmente a la velocidad de alimentación del digestor, la velocidad de rotación y la temperatura de operación.

Una vez determinados estos parámetros e incorporados en los sistemas de control y operación, deberá llevarse un continuo monitoreo tanto de éstos, como de las condiciones al interior del digestor y las características del gas producido, a fin de llevar un registro histórico de ellos. Esta información permite observar el efecto de la variación de alguno de los parámetros en la calidad del proceso en su conjunto, lo que es de vital importancia para la solución de eventuales problemas en la operación posterior de la planta.

Por otra parte, es importante incorporar en el programa de monitoreo del digestor la toma de muestras del sustrato y de los lodos digeridos, a fin de evaluar periódicamente las condiciones de operación, las tasas de degradabilidad, los contenidos de nutrientes, etc. Incorporando esta información a los registros históricos, se pueden evaluar medidas tendientes a optimizar el proceso, a fin de obtener mayores rendimientos de biogás y/o de reducir las necesidades energéticas y de otros insumos de la planta.

7. Claves para el éxito de un proyecto de biogás

La factibilidad de un proyecto de biogás depende de numerosos factores, muchos de los cuales pueden ser controlados por el realizador o dueño del proyecto. En general, los riesgos asociados a este tipo de proyectos pueden minimizarse a través de diversas medidas tendientes a la adquisición de información realista y certera respecto de las condiciones del proyecto, así como del aseguramiento de la calidad de las obras y equipos encargados, la definición de garantías y responsabilidades de los proveedores y el constante monitoreo y control de los procesos.

7.1. Requisitos necesarios. Criterios KO

Para las etapas preliminares del proceso de estudio del proyecto, es conveniente plantearse algunas preguntas, cuya respuesta positiva es necesaria para la viabilidad de un proyecto de este tipo:

1. ¿Es suficiente el sustrato disponible (en largo plazo!) para la generación de biogás?
    a. Desechos sólidos y líquidos propios.
    b. Desechos sólidos y líquidos de industrias vecinas.
2. ¿Es adecuada la calidad del sustrato para la producción de biogás?
    a. Alto contenido orgánico en forma de grasas, azúcares y proteínas.
    b. Bajo contenido de materia no biodegradable (lignina, taninos, etc.) o substancias perturbadoras (tóxicos, ácidos, antibióticos).
3. ¿Existe suficiente espacio para la planta en las cercanías?
4. ¿Existen restricciones ambientales o de uso de suelos insalvables en los terrenos previstos?

7.2. Condiciones para la viabilidad técnica

1. ¿Es posible contar con la tecnología adecuada?
    a. ¿Qué proveedores existen en el país o Iberoamérica?
    b. ¿Qué proveedores Europeos o norteamericanos tienen representación en nuestro país?
    c. ¿Qué garantías entregan los proveedores de tecnología?
    d. ¿Qué servicios de mantenimiento y post-venta ofrecen los proveedores de tecnología?
2. ¿Es posible contratar asesoría experimentada para la planificación del proyecto?

7.3. Condiciones para la viabilidad económica

Otras condiciones que pueden favorecer la rentabilidad de estos proyectos están incorporadas en las siguientes preguntas:

1. ¿Es posible usar la energía térmica generada?
    a. ¿Cuáles son mis requerimientos de combustibles para generación de calor?
    b. ¿Es posible vender la energía térmica a industrias vecinas?
2. ¿Es posible utilizar energía eléctrica generada a partir del biogás?
    a. ¿Cuáles son mis requerimientos de energía y mis costos?
    b. ¿A qué precios puedo vender la energía eléctrica generada?
3. ¿Cuáles es la situación respecto de la disposición de mis residuos?
    a. ¿Son enviados a vertedero o relleno sanitario? (importante para los créditos de carbono)
    b. ¿Cuáles son mis costos de tratamiento y/o disposición actuales?
4. ¿Qué posibilidades existen de reducir costos, utilizando instalaciones existentes o fuerza de trabajo propia para la construcción?
5. ¿Qué instancias de apoyo financiero externo existen y aplican para este tipo de proyectos?

La producción de biogás a través de la digestión anaerobia de residuos orgánicos presenta numerosas ventajas, sobre todo considerando una situación de escasez de gas natural y altos precios de otros combustibles fósiles. El uso de biogás, por otra parte, reduce las emisiones de material particulado a la atmósfera, lo que en áreas declaradas como zonas saturadas puede significar la posibilidad de continuar completamente o con parte de la producción frente a exigencias medioambientales de paralización de actividades (como es el caso pre-emergencias o emergencias ambientales). En determinados casos, los operadores de este tipo de plantas pueden incluso recibir remuneraciones adicionales por concepto de certificados de reducción de emisiones.

Sin embargo, el desarrollo de este tipo de proyectos requiere de un cierto grado de experiencia y conocimientos, tanto en la planificación como en la realización. Es por tanto muy aconsejable, además de adquirir una base de conocimientos propios en el tema, contar con la ayuda y asesoría de profesionales con experiencia en el área, que ayuden a evaluar la confiabilidad de las informaciones recibidas y revisar los diseños y propuestas ofrecidas.

8. Bibliografía

[1] Angelidaki, I.; Alves,M.;Bolzonella, M.; Borzacconi, L.; Campos, J. L.; Guwy, A. J.; Kalyuzhnyi, S. ; Jenicek, P. and van Lier, J. B. ;Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays ; Water Science and Technology 2009, Vol N°59.

[2] Cárdenas-Cleves, L.M.; Parra-Orobio, B.A.;Torres Lozada P & Vasquez Franco, C.H.;. Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano – PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos; 2015.

[3] Torres Lozada P & Pérez A, 2010. Actividad metanogénica específica: una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. Revista EIDENAR: Ejemplar 9 / Enero - Diciembre 2010.

[4] van Lier; J.B.; Tilche, A. B.; Ahring, K.; acarie,T.; Moletta, H. R.; Dohanyos, M.; Hulshoff Pol, L.W.; Lens, P. and Verstraete, W.; New perspectives in anaerobic digestion; Water Science and Technology 2001, Vol N°43.

Red de Tratamiento y reciclaje de aguas industriales mediante soluciones sostenibles fundamentadas en procesos biológicos. (TRITÓN-316RT0506)

PROGRAMA IBEROAMERICANO

CYTED

CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO