

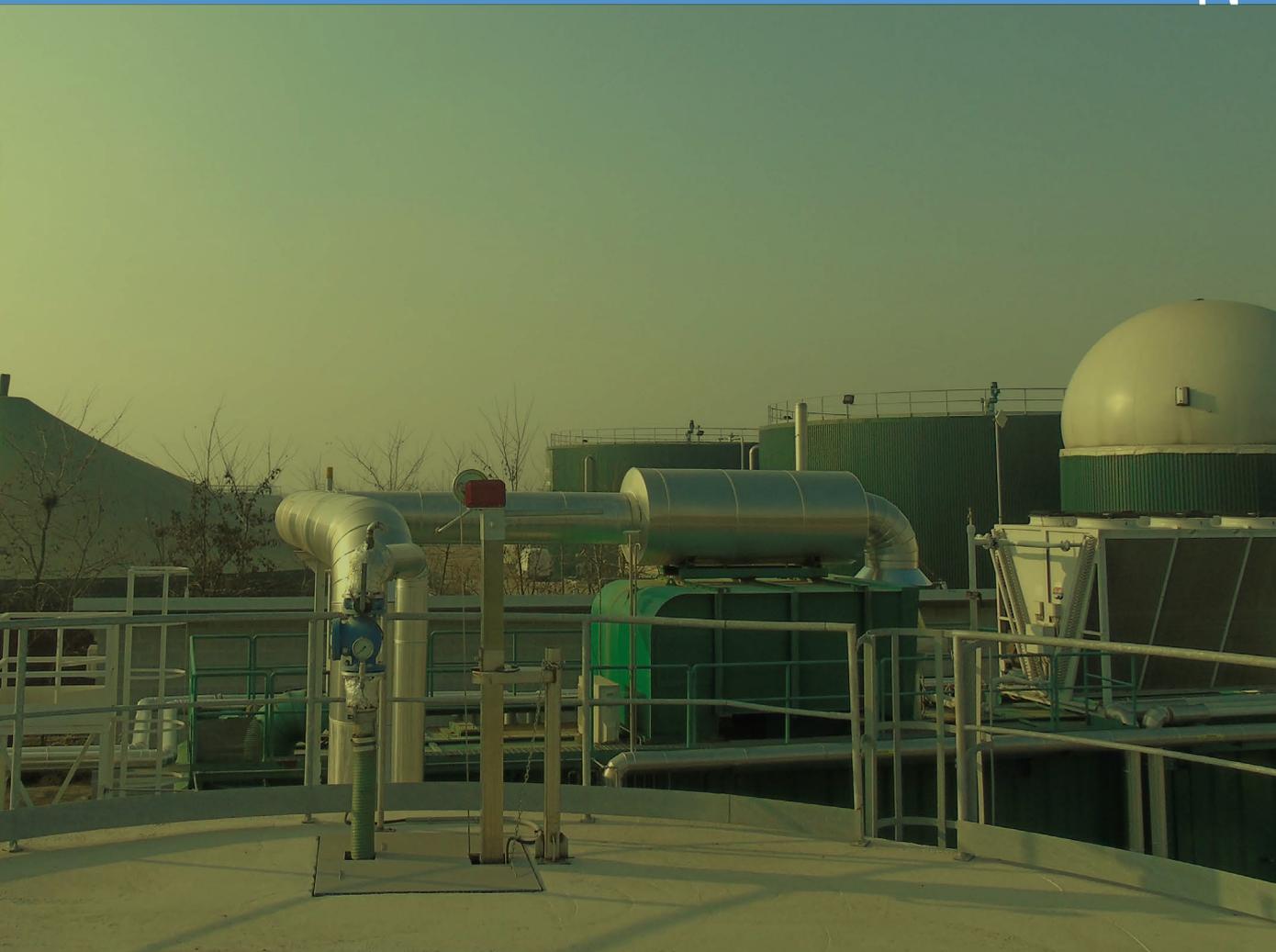


Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura

GUÍA TEÓRICO-PRÁCTICA SOBRE EL BIOGÁS Y LOS BIODIGESTORES

COLECCIÓN DOCUMENTOS TÉCNICOS

Nº 12



Secretaría de Energía
Ministerio de Hacienda
Presidencia de la Nación

Secretaría
de Agroindustria



Ministerio de Producción y Trabajo
Presidencia de la Nación

GUÍA TEÓRICO-PRÁCTICA SOBRE EL BIOGÁS Y LOS BIODIGESTORES

**Proyecto para la promoción de la energía
derivada de biomasa (UTF/ARG/020/ARG)**

FAO. 2019. *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores*. Colección Documentos Técnicos N° 12. Buenos Aires. 104 pp. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), juicio alguno sobre la condición jurídica o nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites. La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la FAO los apruebe o recomiende de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas de la FAO.

ISBN 978-92-5-131559-0
© FAO, 2019



Algunos derechos reservados. Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Organizaciones intergubernamentales.; <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/deed.es>.

De acuerdo con las condiciones de la licencia, se permite copiar, redistribuir y adaptar la obra para fines no comerciales, siempre que se cite correctamente, como se indica a continuación. En ningún uso que se haga de esta obra debe darse a entender que la FAO refrenda una organización, productos o servicios específicos. No está permitido utilizar el logotipo de la FAO. En caso de adaptación, debe concederse a la obra resultante la misma licencia o una licencia equivalente de Creative Commons. Si la obra se traduce, debe añadirse el siguiente descargo de responsabilidad junto a la referencia requerida: "La presente traducción no es obra de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). La FAO no se hace responsable del contenido ni de la exactitud de la traducción. La edición original en inglés será el texto autorizado".

Toda mediación relativa a las controversias que se deriven con respecto a la licencia se llevará a cabo de conformidad con las Reglas de Mediación de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil Internacional (CNUDMI) en vigor.

Materiales de terceros. Si se desea reutilizar material contenido en esta obra que sea propiedad de terceros, por ejemplo, cuadros, gráficos o imágenes, corresponde al usuario determinar si se necesita autorización para tal reutilización y obtener la autorización del titular del derecho de autor. El riesgo de que se deriven reclamaciones de la infracción de los derechos de uso de un elemento que sea propiedad de terceros recae exclusivamente sobre el usuario.

Ventas, derechos y licencias. Los productos informativos de la FAO están disponibles en la página web de la Organización (<http://www.fao.org/publications/es>) y pueden adquirirse dirigiéndose a publications-sales@fao.org. Las solicitudes de uso comercial deben enviarse a través de la siguiente página web: www.fao.org/contact-us/licence-request. Las consultas sobre derechos y licencias deben remitirse a: copyright@fao.org.

Fotografía de portada: ©IFES

Este documento fue realizado en el marco del Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (UTF/ARG/020/ARG), iniciativa de los siguientes ministerios:

Ministerio de Producción y Trabajo

Dante Sica
Ministro de Producción y Trabajo

Luis Miguel Etchevehere
Secretario de Gobierno de Agroindustria

Andrés Murchison
Secretario de Alimentos y Bioeconomía

Miguel Almada
Director de Bioenergía

Ministerio de Hacienda

Nicolás Dujovne
Ministro de Hacienda

Gustavo Lopetegui
Secretario de Gobierno de Energía

Sebastián A. Kind
Subsecretario de Energías Renovables

Maximiliano Morrone
Director Nacional de Promoción
de Energías Renovables

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

Hivy Ortiz Chour
Oficial Forestal Principal
Oficina Regional América Latina

Francisco Yofre
Oficial de Programas
Oficina Argentina

Guido Casanovas
Francisco Della Vecchia
Fernando Reymundo
Roberto Serafini
Autores

Verónica González
Coordinación Colección

Sofía Damasseno
Colaboración Colección

Alejandra Groba
Edición y corrección

Mariana Piuma
Diseño e ilustraciones



© FAO

ÍNDICE

Prólogo	ix		
Agradecimientos	xi		
Siglas y acrónimos	xiii		
Unidades de medida	xiv		
Fórmulas químicas	xiv		
Resumen ejecutivo	xv		
<hr/>			
1.			
Introducción	1		
<hr/>			
2.			
Biodigestión y sistemas de generación de biogás	3		
2.1 Principios físicos, químicos y biológicos que conducen a la generación de biogás	3		
2.2 Etapas de la digestión anaeróbica	4		
2.3 Tipos de biodigestores	14		
<hr/>			
3.			
Biogás y digerido	23		
3.1 Biogás	23		
3.2 Digerido	39		
<hr/>			
4.			
Consideraciones básicas para un estudio de prefactibilidad y diseño de un biodigestor	47		
4.1 Planteo de objetivo	47		
4.2 Análisis de campo	48		
4.3 Diseño propio del biodigestor	49		
4.4 Dimensionamiento del biodigestor	57		
4.5 Ubicación del biodigestor	57		
4.6 Factores de seguridad	58		
4.7 Mantenimiento y controles diarios	58		
<hr/>			
5.			
Cálculos de rendimiento	61		
5.1 Estimación de la producción de biogás	61		
5.2 Estimación de la producción de biofertilizantes	64		
5.3 Ejemplo teórico	65		
<hr/>			
Bibliografía	68		
<hr/>			
Anexo			
Instructivo para el diseño de biodigestores domiciliarios y en batch para laboratorio	73		
Biodigestor rígido	73		
Gasómetro flexible	78		
Gasómetro rígido tipo campana	78		
Biodigestor tubular de membrana	80		
Biodigestor <i>batch</i>	83		
Manómetro	84		

Cuadros

Cuadro 1	Características principales de dos procesos básicos para la producción de biogás	5
Cuadro 2	Ejemplos de inhibidores y concentraciones inhibitoras	13
Cuadro 3	Relación carbono/nitrógeno (C/N) de algunos sustratos	13
Cuadro 4	Reglas empíricas para la evaluación de relaciones FOS/TAC	13
Cuadro 5	Poder calorífico de diferentes fuentes fósiles de energía	24
Cuadro 6	Comparación entre diferentes métodos de obtención de biometano	27
Cuadro 7	Niveles de siloxanos admitidos por fabricantes de equipos de uso de biogás	28
Cuadro 8	Composición físico-química del digerido de central de digestión húmeda con FORSU. Pavia, Italia	40
Cuadro 9	Composición físico-química del digerido de central de digestión seca con FORSU. Múnich, Alemania	41
Cuadro 10	Mediciones indispensables para determinar la cantidad y forma de aplicación de un digerido	43
Cuadro 11	Parámetros físico-químicos para el análisis de los sustratos que alimentan un biodigestor	48
Cuadro 12	Litros de metano producidos en función de los kilogramos de sólidos volátiles	62
Cuadro 13	Metros cúbicos de biogás producidos en función de diferentes tipos de estiércol	62
Cuadro 14	Litros de biogás y de metano producidos en función de los kilogramos de materia seca	63

Gráficos

Gráfico 1	Etapas de la digestión anaeróbica en un biodigestor, con producción de biogás y biofertilizante	4
Gráfico 2	Producción de biogás en laboratorio en función del tiempo para distintos tratamientos	7
Gráfico 3	Producción de biogás en función de la temperatura del proceso	9
Gráfico 4	Curvas de producción de biogás en ensayos con diferentes proporciones de silaje de maíz y estiércol de oveja como inóculo	15
Gráfico 5	Esquema de reactor UASB	19
Gráfico 6	Cámara de biogás interna para almacenamiento	30
Gráfico 7	Vista aérea y corte transversal de gasómetro de doble membrana y sus componentes	32
Gráfico 8	Eficiencia eléctrica y térmica de un cogenerador convencional	35
Gráfico 9	Primer ejemplo de dimensionamiento	65
Gráfico 10	Segundo ejemplo de dimensionamiento	66
Gráfico 11	Biodigestor rígido de laboratorio	74
Gráfico 12	Ejemplo de válvula de seguridad	76
Gráfico 13	Campana hecha con tanques y corte transversal	79
Gráfico 14	Modelo de biodigestor tubular	81
Gráfico 15	Ilustración de manómetro para laboratorio	85

Imágenes

Imagen 1	Biodigestores <i>batch</i>	14
Imagen 2	Biodigestor construido con membrana de PVC	16
Imagen 3	Biodigestor tipo chino	16
Imagen 4	Biodigestor laguna anaeróbica de media-baja tecnología	17
Imagen 5	Biodigestor mezcla completa de alta tecnología	18
Imagen 6	Reactor UASB	20
Imagen 7	Nave interna con portones de bioceldas en planta de digestión seca	21
Imagen 8	Sistema <i>chiller</i> /enfriamiento para secado del biogás	25
Imagen 9	Diferentes tipos de gasómetros flotantes	31
Imagen 10	Gasómetros de doble membrana, en platea de hormigón y sobre biodigestor	32
Imagen 11	Soplador de canal lateral y sopladores lobulares	34
Imagen 12	Central de cogeneración de 1 MW de potencia eléctrica, con recuperación de calor de sistema de refrigeración y gases de escape	36
Imagen 13	Motor Biogás-Otto instalado en central de biogás	37
Imagen 14	Exceso de costra superficial en reservorio de digerido en central de biogás	42
Imagen 15	Segregación de fracciones líquida y sólida con separador helicoidal. Almacenamiento de la fracción sólida	42
Imagen 16	Aplicación de digerido sólido sobre cultivo	45
Imagen 17	Interior de un digestor de hormigón con protección epoxi en la parte superior	50
Imagen 18	Sistema de intercambiador tubo en tubo	51
Imagen 19	Carga de un biodigestor	52
Imagen 20	Cámara de carga de biodigestor en tambo estabulado	52
Imagen 21	Sistema de trituración en cámara de premezcla	53
Imagen 22	Carga de biomasa sólida en tanque de premezcla con pala frontal	53
Imagen 23	Sistema de precarga de biodigestores con diferentes sustratos sólidos y líquidos	53
Imagen 24	Sistema de limpieza de FORSU, pretratamiento para envío del sustrato a tanque de precarga	53
Imagen 25	Vista externa de agitador horizontal en muro de biodigestor	55
Imagen 26	Vista interna de agitadores verticales de acero inoxidable	55
Imagen 27	Bomba lobular	56
Imagen 28	Bomba de tornillo	56
Imagen 29	Fases del armado de un filtro de sulfhídrico domiciliario	77
Imagen 30	Gasómetro de membrana de PVC con filtro de sulfhídrico y válvula de seguridad incorporada	78
Imagen 31	Instalación de biodigestor tubular	81
Imagen 32	Instalación de estructura para nylon cobertor	82
Imagen 33	Biodigestor tubular con aislante de lana de vidrio	82
Imagen 34	Boca de entrada de biodigestor tubular hecha con silicona	83
Imagen 35	Llavín de paso de gas para digestor batch de laboratorio	84
Imagen 36	Sellado de salida de gas para digestor batch de laboratorio	84



© FAO

Prólogo

La matriz energética argentina está conformada, en su gran mayoría, por combustibles fósiles. Esta situación presenta desafíos y oportunidades para el desarrollo de las energías renovables, ya que la gran disponibilidad de recursos biomásicos en todo el territorio nacional constituye una alternativa eficaz frente al contexto de crisis energética local e internacional. En este escenario, en 2015, la República Argentina promulgó la Ley 27191 –que modificó la Ley 26190–, con el objetivo de fomentar la participación de las fuentes renovables hasta que alcancen un 20% del consumo de energía eléctrica nacional en 2025, otorgándole a la biomasa una gran relevancia.

La biomasa es una de las fuentes de energía renovable más confiables, es constante y se puede almacenar, lo que facilita la generación de energía térmica y eléctrica. En virtud de sus extraordinarias condiciones agroecológicas, y las ventajas comparativas y competitivas de su sector agroindustrial, la Argentina es un gran productor de biomasa con potencial energético.

La energía derivada de biomasa respeta y protege el ambiente, genera nuevos puestos de trabajo, integra comunidades energéticamente vulnerables, reduce la emisión de gases de efecto invernadero, convierte residuos en recursos, moviliza inversiones y promueve el agregado de valor y nuevos negocios.

No obstante, aún existen algunas barreras de orden institucional, legal, económico, técnico y sociocultural que deben superarse para incrementar, de acuerdo con su potencial, la proporción de bioenergía en la matriz energética nacional.

En este marco, en 2012, se creó el Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa – UTF/ARG/020/ARG (PROBIOMASA), una iniciativa que llevan adelante la Secretaría de Gobierno de Agroindustria del Ministerio de Producción y Trabajo, y la Secretaría de Gobierno de Energía del Ministerio de Hacienda, con la asistencia técnica y administrativa de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

El Proyecto tiene como objetivo principal incrementar la producción de energía térmica y eléctrica derivada de biomasa a nivel local, provincial y nacional, para asegurar un creciente suministro de energía limpia, confiable y competitiva y, a la vez, abrir nuevas oportunidades agroforestales, estimular el desarrollo regional y contribuir a mitigar el cambio climático.

Para lograr ese propósito, el Proyecto se estructura en tres componentes principales con objetivos específicos:

- Estrategias bioenergéticas: asesorar y asistir, legal, técnica y financieramente, a proyectos bioenergéticos y tomadores de decisión para aumentar la participación de la energía derivada de biomasa en la matriz energética.
- Fortalecimiento institucional: articular con instituciones de nivel nacional, provincial y local a fin de evaluar los recursos biomásicos disponibles para la generación de energía aplicando la metodología WISDOM (Woodfuels Integrated Supply/Demand Overview Mapping, Mapeo de Oferta y Demanda Integrada de Dendrocombustibles).
- Sensibilización y extensión: informar y capacitar a los actores políticos, empresarios, investigadores y público en general acerca de las oportunidades y ventajas que ofrece la energía derivada de biomasa.

Esta Colección de Documentos Técnicos pone a disposición los estudios, investigaciones, manuales y recomendaciones elaborados por consultoras y consultores del Proyecto e instituciones parte, con el propósito de divulgar los conocimientos y resultados alcanzados y, de esta forma, contribuir al desarrollo de negocios y al diseño, formulación y ejecución de políticas públicas que promuevan el crecimiento del sector bioenergético en la Argentina.

Agradecimientos

La elaboración de esta publicación ha sido posible gracias a la cooperación de las secretarías de Gobierno de Agroindustria, de Energía y de Ambiente y Desarrollo Sustentable, así como del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).

También cabe un agradecimiento a la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (FAUBA), en especial a la Cátedra de Química Analítica, en la persona de Alicia Fabrizio de Iorio; a la Red de Biodigestores en Latinoamérica y el Caribe; a Diego Musolino y Alejandro Loidl, de la Fundación Energizar, y a Margarita Ruda, del Centro Atómico Bariloche – Comisión Nacional de Energía Atómica.

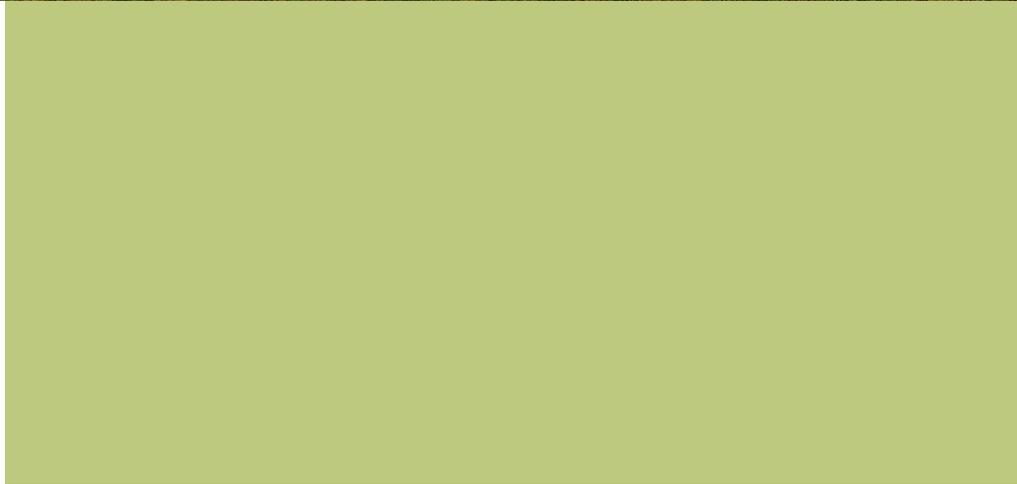
Asimismo, se agradece a Agustina Branzini y María Alejandra Barlattey por sus comentarios sobre este documento.



© FAO



© FAO



Siglas y acrónimos

AGV	Ácidos grasos volátiles
ASTM	<i>American Society of Testing Materials</i> – Sociedad Americana de Testeo de Materiales
BGNL	Biometano licuado
BH	Biomasa húmeda
BS	Biomasa seca
CER	Certificados de Emisiones Reducidas
CHP	Cogeneración eléctrica-térmica
DBO	Demanda biológica de oxígeno
DMEA	Metildietanolamina
DQO	Demanda química de oxígeno
EPDM	Etileno propileno dieno tipo M (ASTM)
FORSU	Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos
FOS	<i>Flüchtlge Organische Säuren</i> – Ácidos orgánicos volátiles
GNC	Gas natural comprimido
GNV	Gas natural vehicular
MCFC	Pila de combustible de carbonato fundido
MEA	Monoetanolamina
MEyM	ex Ministerio de Energía y Minería
MH	Materia húmeda
MS	Materia seca
nmp	Número más probable
OLR	Velocidad de carga orgánica
PAFC	Pila de combustible de ácido fosfórico
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PDA o PEAD	Polietileno de alta densidad
PEM	Pila de combustible de membrana de intercambio protónico
PERMER	Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales
PPN	Polipropileno
PRFV	Plástico reforzado con fibra de vidrio
PSA	Adsorbimiento a presión oscilante
PVC	Policloruro de vinilo
PWS	Lavado con agua bajo presión
RAFA	Reactor anaeróbico de flujo ascendente
RAS	relación de adsorción de sodio
SENASA	Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria
SOFC	Pila de combustible de óxido sólido
SV	Sólidos volátiles
TAC	<i>Totales Anorganisches Carbonat</i> – Carbonato inorgánico total
TRH	Tiempo de retención hidráulica
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UV	Rayos ultravioleta

Unidades de medida

g	gramo
ha	hectárea
kW/h	kilowatt hora
kcal	kilocaloría
kg	kilogramo
kg MH.día	kilogramos de materia húmeda por día
kW	kilovatio
kWe	kilovatio eléctrico
kWh	kilovatio hora
l	litro
m	metro
m ³	metro cúbico
m/m	masa en masa
mg	miligramo
ml	mililitro
mm	milímetro
mV	milivoltio
MW	Megavatio
MW/h	Megavatio hora
Nm ³	metro cúbico normal de biogás o gas
Nml	mililitro normal de biogás o gas
t	tonelada
tep	tonelada equivalente de petróleo

Fórmulas químicas

C	Carbono	H ₂ S	Sulfuro de hidrógeno
Ca	Calcio	K	Potasio
CaCl ₂	Cloruro de calcio	Mg	Magnesio
CaCO ₃	Carbonato de calcio	N	Nitrógeno
CH ₃ COO	Acetato	N-NH ₄ ⁺	Nitrógeno amoniacal
CH ₄	Metano	Na	Sodio
CO ₂	Dióxido de carbono	NaCl	Cloruro de sodio
COd	Carbono orgánico disuelto	NH ₃	Amoníaco
COt	Carbono orgánico total	Ni	Níquel
Cr	Cromo	NOx	Óxidos de nitrógeno
Cu	Cobre	SOx	Óxidos de azufre
H ₂	Hidrógeno molecular	SO ₄	Sulfato

Resumen ejecutivo

Esta Guía tiene como objetivo brindar conocimientos para la implementación de proyectos de biodigestión anaeróbica a diferentes escalas, para el aprovechamiento energético del biogás y la revalorización económica de los efluentes orgánicos.

En tal sentido, y a fin de transmitir los conceptos teóricos y prácticos de la tecnología de biodigestión anaeróbica, el trabajo se dividió en cuatro bloques: el primero explica los conceptos básicos de la digestión anaeróbica y caracteriza diferentes tipos de biodigestores; el segundo analiza la composición y los usos del biogás y del digerido; el tercero se enfoca en las cuestiones esenciales para el diseño de un biodigestor y el cuarto se introduce en los cálculos de rendimiento. Finalmente, en el Anexo se brinda un instructivo para el diseño de digestores domiciliarios y en *batch*, para laboratorio.



© FAO

1. INTRODUCCIÓN



Este documento se propone servir de guía y herramienta para una visión integral de la biodigestión anaeróbica, con aplicaciones prácticas.

En 2013, con el objetivo de brindar un programa de capacitación introductoria y general sobre la biodigestión anaeróbica, el Componente de Sensibilización y Extensión del Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (PROBIOMASA) convocó a los autores del presente trabajo para dictar una serie de cursos sobre biogás para energía que, además de facilitar conocimientos teóricos, sirviera para incentivar el desarrollo de proyectos bioenergéticos en el país.

En ese marco, se dictaron 37 cursos en 14 provincias de la República Argentina: Buenos Aires, Entre Ríos, Mendoza, Corrientes, Salta, Jujuy, Córdoba, Tucumán, Tierra del Fuego, Santa Fe, Chubut, Chaco, Misiones y Catamarca. En estos últimos cinco años, esos cursos ya han capacitado a más

de 4 500 productores, empresarios agropecuarios y agroindustriales, funcionarios, técnicos, profesionales, docentes y alumnos.

Tal experiencia puso de manifiesto el creciente interés en relación con el biogás y la biodigestión anaeróbica, acompañando la necesidad de resolver los problemas ambientales, las restricciones energéticas y la sustentabilidad de los suelos con buenas prácticas de manejo, sumado a nuevas políticas de promoción y desarrollo en materia de energías renovables.

En ese contexto, esta guía sistematiza los conocimientos y experiencias transmitidos en los cursos, a fin de ofrecer una lectura accesible a públicos amplios y generar una base de conocimiento sólida sobre el biogás y los biodigestores, con sus ventajas y dificultades, a partir de la cual los lectores puedan enfocarse en los aspectos que prefieran.

2. BIODIGESTIÓN Y SISTEMAS DE GENERACIÓN DE BIOGÁS



Entre las energías renovables, el biogás despierta un interés creciente, ya que contribuye a resolver tanto restricciones energéticas como problemas ambientales.

2.1 Principios físicos, químicos y biológicos que conducen a la generación de biogás

La producción de biogás es un proceso complejo que requiere de la acción coordinada de un grupo de microorganismos especializados en la degradación de una amplia variedad de sustratos orgánicos (restos de comida, desperdicios orgánicos de industrias, subproductos orgánicos de bajo valor comercial, cultivos energéticos, residuos cloacales, estiércol de animales, etc.). La descomposición de estos residuos en el ambiente natural o en reactores especializados, bajo condiciones de anoxia (ausencia de oxígeno), genera las condiciones imprescindibles para el proceso. El biogás producido se encuentra compuesto principalmente por dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), y en menor medida otros gases, entre los que se destaca el sulfuro de hidrógeno (H_2S), un gas altamente tóxico, responsable

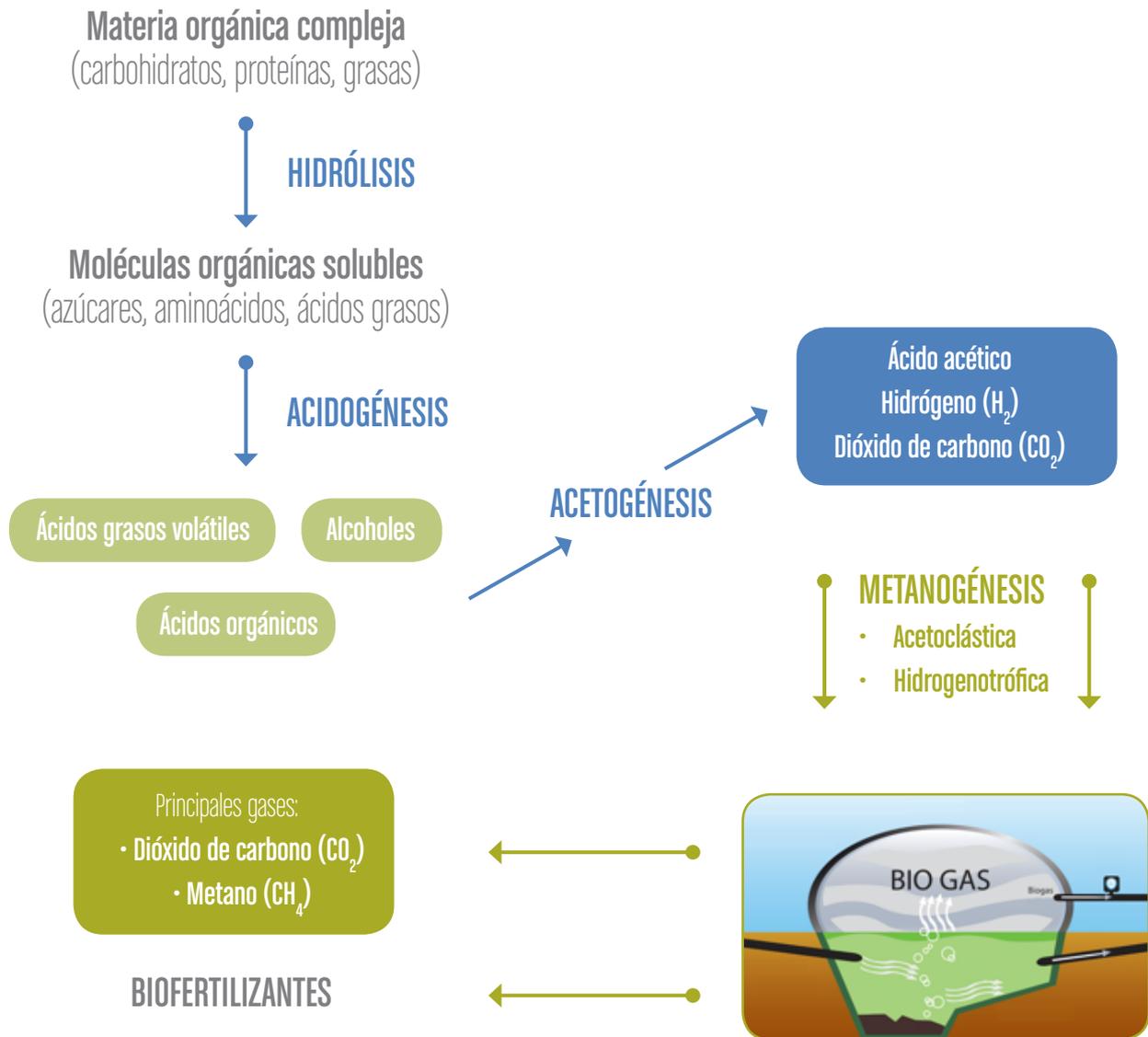
del olor fuerte y desagradable que se percibe en los ambientes naturales donde se genera biogás por la degradación anaeróbica de la materia orgánica.

Dado que la solubilidad del oxígeno en agua es baja, cuando los sedimentos de los cuerpos de agua naturales (lagos o ríos), las lagunas de tratamiento (tambos, granjas de cerdos, *feedlots*, lagunas cloacales y otros) o los lixiviados de los rellenos sanitarios tienen elevados niveles de materia orgánica, su descomposición microbiana genera biogás, que contiene metano, químicamente comparable al gas natural que se obtiene en la explotación de yacimientos de combustibles fósiles.

Para controlar y eficientizar la digestión anaeróbica de la materia orgánica y producir biogás se utilizan biodigestores. Estos son reactores especialmente diseñados para maximizar la eficiencia de conversión de los sustratos en energía y obtener subproductos con valor agregado, como biofertilizantes.

2.2 Etapas de la digestión anaeróbica

Gráfico 1. Etapas de la digestión anaeróbica en un biodigestor, con producción de biogás y biofertilizante



Fuente: Elaborado por los autores.

El proceso global puede ser dividido para su estudio en tres etapas principales (Gráfico 1), aunque debe comprenderse que en los digestores las reacciones ocurren simultáneamente:

1. **Hidrólisis:** La materia orgánica compleja (hidratos de carbono, proteínas, lípidos, etc.) es degradada por la acción de microorganismos en materia orgánica soluble (azúcares, aminoácidos, ácidos grasos), lo que genera los sustratos para la siguiente etapa.
2. **Acidogénesis y acetogénesis:** Distintos grupos de microorganismos, denominados acidogénicos y acetogénicos, procesan esa materia orgánica soluble y liberan principalmente hidrógeno molecular (H_2), CO_2 y acetato (CH_3COO^-). Dado que la acidogénesis es considerada la etapa más rápida del proceso global, resulta fundamental controlarla para evitar que el descenso de pH (acidificación) del medio interfiera con la acción del consorcio microbiano.
3. **Metanogénesis:** Finalmente, los microorganismos metanogénicos tienen dos vías metabólicas diferentes: la vía acetoclástica, que transforma el ácido acético en CH_4 y CO_2 , y la vía hidrogenotrófica, que a partir del H_2 y el CO_2 genera CH_4 .

Las transformaciones químicas y físicas que sufre la materia orgánica en estos procesos no solo conducen a la producción de biogás, sino que además pueden generar un residuo estabilizado (digerido) que tiene propiedades adecuadas para ser utilizado como biofertilizante (ver Capítulo N.º 3).

Si bien se espera que la correcta aplicación de la tecnología permita alcanzar la máxima eficiencia en el proceso, la adecuada comprensión de las bases físicas, químicas y biológicas de la digestión anaeróbica puede determinar el éxito de los proyectos que se implementen. Los procesos biológicos en todos los biodigestores son similares; la tecnología permite obtener de ellos el máximo rendimiento (Cuadro 1).

Puede establecerse de manera sencilla una analogía entre los procesos que tienen lugar en un digestor anaeróbico y el funcionamiento del sistema digestivo de un rumiante. Al comer, en el rumen de una vaca o de una oveja tiene lugar un proceso de hidrólisis enzimática de polímeros, al que se suman la acidogénesis y acetogénesis descritas. Los microorganismos que participan de esta primera etapa son tolerantes a variaciones en el medio, como cambios en la temperatura y el pH, y pueden vivir en presencia de oxígeno.

En el rumen, un tejido especializado (papilas ruminales) consume los ácidos grasos volátiles

Cuadro 1. Características principales de dos procesos básicos para la producción de biogás

Fase acidogénica	Fase metanogénica
Bacterias facultativas	Bacterias anaeróbicas estrictas
Reproducción muy rápida	Reproducción lenta
Poco sensibles a los cambios de acidez y temperatura	Muy sensibles a los cambios de acidez y temperatura
Principales productos finales: metabolitos, ácidos orgánicos	Principales productos finales: metano y dióxido de carbono

Fuente: Elaborado por los autores.

y otros ácidos orgánicos, los cuales constituyen una de las principales fuentes de energía de los rumiantes. De esta forma, el pH se estabiliza, lo cual contribuye a preservar la salud del tejido y garantiza la continuidad del proceso digestivo.

En un biodigestor, los ácidos orgánicos son consumidos por microorganismos metanogénicos, transformados en biogás y eliminados del medio. Los rumiantes también tienen poblaciones simbióticas de microorganismos metanogénicos en su sistema digestivo, y es por esto que pueden eructar metano. Sin embargo, en las explotaciones comerciales se busca limitar este proceso, para evitar que el alimento suministrado al rodeo, en vez de transformarse en carne o en leche, se convierta en metano que se pierde del sistema. Los productores suelen recurrir al uso de probióticos, concentrados enzimáticos o eventualmente a la suplementación con ácidos orgánicos con el objetivo de inhibir parcialmente la metanogénesis (Carmona *et al.*, 2005).

Debe destacarse que los microorganismos que llevan adelante la fase metanogénica de la degradación anaeróbica de la materia orgánica son muy particulares. Suelen prosperar en ambientes sumamente hostiles para organismos convencionales, por lo que se los define como extremófilos (Ríos *et al.*, 2007) y tienen características que los diferencian claramente de las bacterias propiamente dichas. Basándose en estas diferencias, algunos autores han llegado incluso a postular una clasificación de los seres vivos alternativa a la propuesta por Margulis, sobre la que existe en la actualidad una gran controversia (Curtis *et al.*, 2008). Al prosperar en ambientes extremos (en este caso ausencia total de oxígeno), esos microorganismos se caracterizan por una reproducción muy lenta. Además, requieren de aportes externos de energía (en forma de calor) para llevar adelante sus procesos metabólicos y son altamente sensibles a los cambios en el ambiente (pH y temperatura). Por último, y a diferencia de otros organismos heterótrofos, la degradación de la materia orgánica no solo conduce a la liberación de dióxido de carbono, sino que además produce metano.

Se puede imaginar entonces qué pasa si un biodigestor es alimentado con un sustrato altamente digestible y rico en energía:

1. Los microorganismos hidrolizan rápidamente los carbohidratos, proteínas y grasas (moléculas complejas y de alto peso).
2. Las bacterias acidogénicas comienzan a consumir el alimento altamente digestible y se reproducen rápidamente, liberando en poco tiempo grandes cantidades de ácidos al medio, que se vuelve totalmente anóxico (carente de oxígeno) y reductor.
3. Las bacterias metanogénicas comienzan a consumir el ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, y producen biogás. Sin embargo, este proceso ocurre a una tasa inferior a la de generación de ácidos, como resultado de sus bajas velocidades de crecimiento.
4. El medio comienza a acidificarse (pH<6).
5. Las bacterias metanogénicas disminuyen su metabolismo, reproducción y actividad, por ser altamente sensibles a los cambios en el pH.
6. El biodigestor deja de producir biogás y se observa una disminución marcada del pH por debajo de 5.

Esta secuencia de acontecimientos es muy común que ocurra si no se controla ni se tiene un seguimiento sobre la alimentación del biodigestor, tanto en tiempo como en cantidad. De hecho, en los rumiantes ocurre un fenómeno similar cuando por cuestiones de manejo se les reemplaza una alimentación con pasturas por una dieta rica en carbohidratos altamente digeribles (por ejemplo, grano de maíz partido). En estas circunstancias, se da el proceso detallado anteriormente, con la diferencia de que son las paredes del rumen, que absorben estos ácidos, las que se ven afectadas, y la falla de su funcionamiento por la acidificación puede causar incluso la muerte del animal.

Resulta necesario aclarar que lo expuesto no implica que los biodigestores no puedan ser alimentados con sustratos ricos en energía altamente digerible, o modificarse los sustratos a degradar durante el desarrollo del proceso. Al igual que en los sistemas productivos bovinos intensivos, estas dietas deben suministrarse progresiva y adecuadamente

para permitir el correcto desarrollo de las bacterias metanogénicas. Al tener las tasas más bajas de crecimiento y reproducción de todo el consorcio microbiano, y por su especial sensibilidad a las variaciones en las condiciones ambientales, los microorganismos metanogénicos representan el componente limitante de todo el sistema.

En el Gráfico 2, se representan los resultados de un ensayo en *batch*, llevado a cabo en laboratorio, en el que se analizaron distintos sustratos y se midió su potencial de producción de biogás. Entre esos sustratos se evaluó estiércol de oveja, silaje de maíz y glicerol crudo proveniente de la industria del biodiesel.

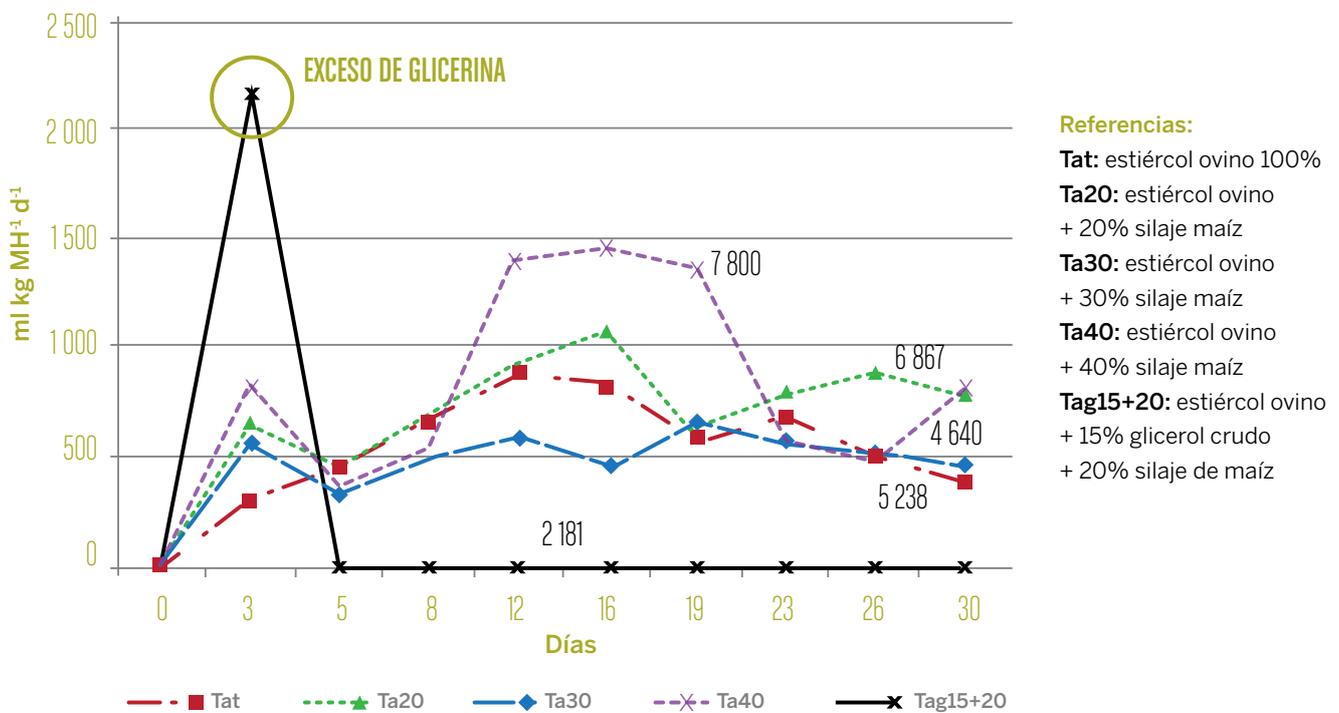
Resulta interesante observar que en el tratamiento con agregado de silaje y glicerol crudo en altas cantidades (Tag15+20) la producción de biogás incrementó rápidamente en los primeros días del ensayo. Esto podría explicarse porque el glicerol crudo es considerado un sustrato rico en

energía altamente disponible. Sin embargo, al caracterizarlo, se observó que principalmente estaba constituido por CO₂, derivado de los procesos de hidrólisis y acidogénesis. A partir del quinto día el tratamiento Tag15+20 no produjo más biogás, y cuando al finalizar el ensayo se midió el pH de cada tratamiento, el valor de Tag15+20 se encontró por debajo de 5,5, lo que resulta inhibitorio para el proceso de metanogénesis. Los otros tratamientos siguieron un desarrollo normal en el tiempo.

Cuando en un sistema de biodigestión se utilizan varios sustratos, como en el ejemplo visto anteriormente, el proceso se denomina codigestión.

Si bien la codigestión puede ser considerada como un simple proceso de mezcla de diferentes sustratos, se trata de una herramienta que permite incrementar la eficiencia de la digestión de los materiales, maximizar la producción de biogás y optimizar la calidad de los biofertilizantes.

Gráfico 2. Producción de biogás en laboratorio en función del tiempo para distintos tratamientos



Fuente: Della Vecchia (2010).

Parámetros físico-químicos de control

Existe una gran cantidad de análisis químicos y físicos, que se pueden hacer tanto a los sustratos como al material dentro de un biodigestor, que permiten entender cómo está funcionando el sistema y estimar cuáles van a ser los rendimientos potenciales. A continuación se explican los factores que resultan claves para garantizar el funcionamiento de un biodigestor, relativos a aspectos físicos o químicos, y cómo se relacionan con la tecnología.

- pH

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una determinada solución. Guarda una relación con la actividad de los iones hidrógeno y los procesos de generación y degradación de ácidos orgánicos dentro del biodigestor. Es fundamental controlar este factor ya que, como se señaló, el sistema biológico encargado de la generación de biogás es altamente dependiente del pH, en especial los microorganismos metanogénicos encargados de la producción de metano.

El pH puede variar como consecuencia de las características de la mezcla que ingresa al biodigestor y debido a los procesos que ocurren allí dentro (por ejemplo, acidosis). Resulta fundamental entonces realizar un control periódico del pH, tanto del material que ingresa como del que sale, a fin de prepararse para realizar correcciones antes de que disminuya a un punto de no retorno, en el que se inhiba el metabolismo de los microorganismos metanogénicos y no se produzca biogás. Un pH óptimo se encuentra en el rango de 7,0 a 7,8 (Babae y Shayegan, 2011).

- Potencial redox

Para que los microorganismos metanogénicos se desarrollen a su plena capacidad, es necesario que se encuentren en un medio reductor. Los valores de potencial redox necesarios oscilan entre -370 y -220 mV.

- Temperatura

Otro factor básico que afecta el funcionamiento de un biodigestor es la temperatura. Esta depende de

muchas variables, como el tipo de tecnología del biodigestor, los materiales usados en su construcción, la región y el clima en donde se encuentre, y la temperatura de la mezcla utilizada para su alimentación.

El rango de temperatura en el que se puede producir el proceso de biodigestión es bastante amplio, entre 10 y 55 °C. Según la temperatura, los biodigestores y los procesos pueden agruparse dentro de tres grupos principales:

- Psicrófilicos: operan en un rango de 10 a 25 °C.
- Mesófilicos: operan en un rango de 25 a 40 °C.
- Termófilicos: operan en un rango de 40 a 55 °C.

Para un mismo tiempo y material, se producirá más biogás a temperaturas termófilicas que a temperaturas psicrófilicas, como puede observarse en el Gráfico 3.

La temperatura no es un factor fácil de manejar, ya que para mantener la mezcla en un biodigestor a 55 °C cuando la temperatura externa ambiental promedio los 10 °C se necesitan materiales y un buen sistema de aislación, así como también sistemas de generación de calor.

Es importante tener en cuenta que los biodigestores que trabajan en rangos termófilicos son más sensibles e inestables frente a pequeñas variaciones en el proceso o en el sustrato, que pueden incluso inhibir la biodigestión. Si bien en estos casos aumenta la solubilidad de la materia orgánica, lo que supone un proceso de biodigestión más rápido, también se incrementa la solubilidad de compuestos tóxicos. Esto implica mayores costos de inversión en obra y, como consecuencia, plazos de amortización más prolongados.

Sin embargo, en muchos casos estos costos adicionales son asimilables, mientras que la alternativa de construir biodigestores mesófilicos o psicrófilicos, más grandes –ya que a mayores temperaturas en menor tiempo puede procesarse más cantidad de material–, puede implicar inversiones superiores debido a la necesidad de redimensionar los digestores o de contar con superficies extensas para su localización.

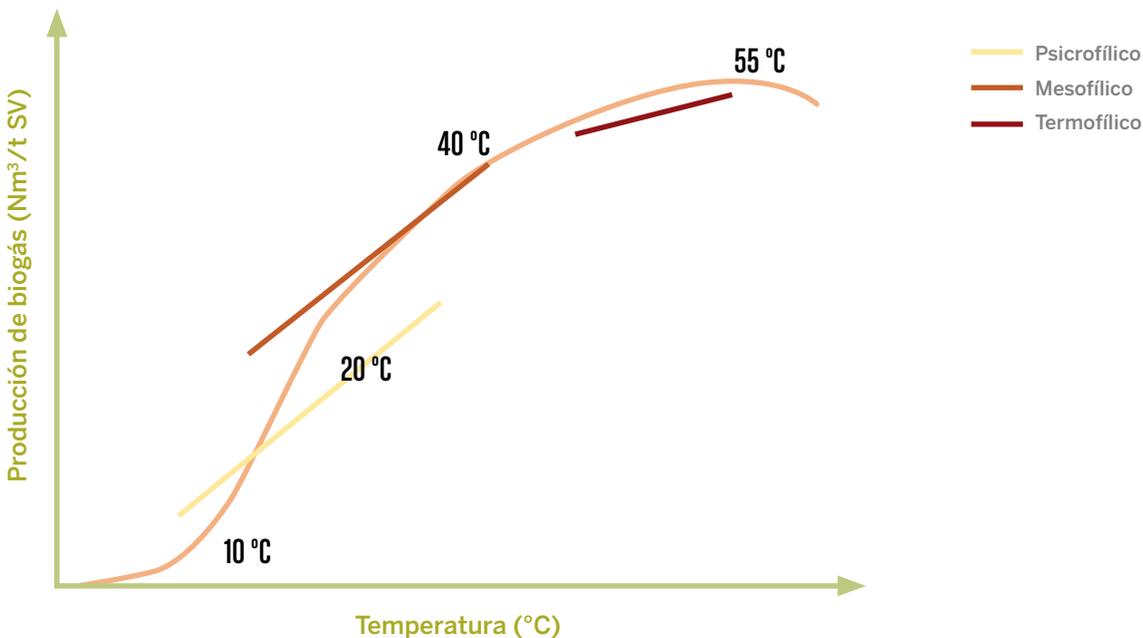
La elección de la temperatura de funcionamiento del biodigestor deberá realizarse tomando en consideración el objetivo del proceso de digestión anaeróbica, los recursos disponibles para la construcción, las condiciones de operación, la disponibilidad de superficie y el nivel tecnológico. No es lo mismo diseñar, por ejemplo, un proyecto para un tambo, en el que se busca tratar efluentes con una consecuente recuperación de energía, que un proyecto de generación de energía eléctrica para inyectar a la red continuamente durante las 24 horas del día.

Es importante recordar que en los distintos rangos de temperatura trabajan grupos de microorganismos diferentes, por eso muchas veces no es primordial intentar operar a la más alta temperatura posible, sino garantizar que esta sea estable dentro del biodigestor. Si varía, difícilmente las poblaciones de microorganismos puedan colonizar el medio de forma permanente y, en consecuencia, la producción de biogás no será constante.

La temperatura del proceso actúa también sobre sus aspectos físico-químicos. La solubilidad de los gases generados desciende al aumentar la temperatura, lo que favorece la transferencia líquido-gas. Una posible desventaja de este fenómeno es que el descenso de la solubilidad del CO_2 provocaría un aumento del pH, lo que generaría, en sustratos de elevada concentración de amonio, inhibición por amoníaco (NH_3).

Por otra parte, la solubilidad de la mayoría de las sales aumenta con la temperatura, de manera que la materia orgánica es más accesible para los microorganismos, lo que incrementa la velocidad del proceso. Sin embargo, si se trata de compuestos tóxicos, al aumentar su solubilidad, con la temperatura serán potencialmente más tóxicos, lo que puede explicar parcialmente la mayor inhibición de determinados compuestos orgánicos en el rango termofílico, como los ácidos grasos (AG) de cadena larga.

Gráfico 3. Producción de biogás en función de la temperatura del proceso



Fuente: Elaborado por los autores.

Además, la temperatura influye directamente en determinados equilibrios químicos con gran influencia sobre el proceso anaeróbico, como los del amonio-amoniaco libre o ácidos grasos volátiles (AGV) ionizados-no ionizados. En general, con la temperatura se favorecen las formas no ionizadas, que resultan más tóxicas para los microorganismos (NH_3 y AGV- no ionizados).

Por último, la viscosidad de sólidos y semisólidos disminuye al aumentar la temperatura, lo que implica menores necesidades de agitación.

- **Tiempo de retención hidráulica**

El tiempo de retención hidráulica (TRH o THR) indica el tiempo medio de permanencia del sustrato en el biodigestor, sometido a la acción de los microorganismos, y no es más que el cociente entre el volumen del reactor y el caudal diario de carga.

Esta variable determina el volumen del reactor y se encuentra directamente relacionada con la temperatura y, en consecuencia, con la tecnología a utilizar.

Para producir una determinada cantidad de biogás en rangos psicrófilos se requieren valores de TRH mayores que en rangos mesófilos o termófilos. A mayor temperatura, menor TRH.

Para los distintos procesos, los TRH pueden ser muy variables:

- Psicrófilos: de 50 a 120 días.
- Mesófilos: de 25 a 50 días.
- Termófilos: de 15 a 25 días.

Para dimensionar un biodigestor resulta necesario conocer la tasa diaria de alimentación y el TRH. Esta última variable guardará una relación directa con la temperatura de operación elegida.

$$\text{TRH (días)} \times \text{Cantidad de carga (m}^3\text{/día)} = \text{Volumen útil del biodigestor (m}^3\text{)}^1$$

¹ La expresión "volumen útil de biodigestor" indica el volumen de líquido dentro del reactor, al que resulta necesario sumarle un volumen estimado que operará como cámara de biogás y que puede ser variable (ver Capítulo N.º 4).

Existen muchos modelos, diseños y tecnologías de biodigestión. Los biodigestores utilitarios suelen tener una alimentación continua o semicontinua, es decir que son alimentados todos los días o regularmente. Cada vez que ingresa al biodigestor un sustrato, sale prácticamente el mismo volumen, con grados variables de digestión. El volumen dentro del biodigestor es siempre estable.

La degradación de la materia orgánica en un sistema anaeróbico sigue una tendencia asintótica, con una eliminación completa a tiempo infinito, y una producción de gas por unidad de volumen de reactor con un máximo para un tiempo de retención correspondiente a una eliminación de sustrato de entre el 40 y el 60% (masa/masa) (Fedailaine *et al.*, 2015).

- **Velocidad de carga orgánica**

Este parámetro indica la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo. La velocidad de carga orgánica (OLR) dependerá del tipo de sustrato orgánico utilizado, ya que este determina el nivel de actividad bioquímica que ocurre dentro del biodigestor. Valores bajos de OLR implican elevados TRH y/o baja concentración de sólidos volátiles (SV) en el influente, mientras que incrementos en la OLR conllevan una reducción en la producción de biogás por unidad de SV introducida. La OLR óptima deberá determinarse para cada instalación y sustrato a utilizar, para optimizar la operación técnica y económica del biodigestor.

- **Materia seca y grado de mezclado**

La materia seca (MS) es la cantidad de material que queda cuando se seca una muestra fresca en estufa a 105,5 °C durante 24 horas y se le extrae toda el agua que contiene. En otras palabras, es la cantidad de sólidos que puede haber en una mezcla.

Si bien la biodigestión es un proceso netamente biológico que lleva adelante una gran variedad de microorganismos, puede desarrollarse en medios muy diferentes. De acuerdo con el contenido de MS del sustrato a degradar, los procesos y tecnologías pueden dividirse en tres grandes grupos:

- **Biodigestión húmeda:** Ocurre en un medio líquido con porcentajes de sólidos que van del 1% al 15-17%. La presente guía se enfoca en los biodigestores que realizan este tipo de trabajo.
- **Biodigestión líquida:** Se produce mediante procesos y tecnologías desarrollados para tratar grandes cantidades de efluentes netamente líquidos, con porcentajes de sólidos que rara vez superan el 1%, como los reactores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), o RAFA (reactor anaeróbico de flujo ascendente), o de lecho fluidizado.
- **Biodigestión seca y/o semiseca:** Se desarrolla con tecnologías que permiten tratar residuos con contenidos de MS superiores al 20 por ciento.

En los biodigestores húmedos, el contenido de MS se determinará en función del nivel tecnológico y el grado de mezclado que se emplearán. En sistemas industriales en los que se busca maximizar la producción de biogás por metro cúbico de biodigestor, se utilizan contenidos elevados de MS en la mezcla de alimentación y es necesario contar con un sistema de agitación continuo que evite la sedimentación de material inerte y/o la formación de costra superficial por flotación, principalmente de material fibroso. Por el contrario, los sistemas de biodigestión domésticos o de baja tecnología que no cuentan con un sistema eficiente de agitación deben ser alimentados con bajos contenidos de MS.

Así, la cantidad de MS de una mezcla está relacionada con las tecnologías de agitación óptimas para cada proceso. Cuanto mayor contenido de MS haya, más cuidado hay que tener en los sistemas de mezcla y agitación.

En relación con la temperatura de proceso, cuanto mayor sea, más disminuirá la viscosidad del sustrato dentro del biodigestor, con lo que necesitará menor agitación que un sistema frío con mayor viscosidad.

- **Sólidos volátiles**

Los sólidos volátiles (SV) son los sólidos que volatilizan a altas temperaturas, superiores a 550 °C. Para su determinación se introduce una muestra de MS en una mufla a esa temperatura durante 6 horas. La diferencia entre la MS y lo que queda

(cenizas) son los SV. Este es un dato importante, ya que la producción de biogás está relacionada con los SV, y conociendo los resultados de una muestra se pueden realizar comparaciones entre distintos sustratos y tecnologías.

Suele ocurrir que el sistema de recolección de los residuos orgánicos arrastra mucho material inerte, que dentro del biodigestor sólo ocupa volumen sin ningún beneficio y con el agravante de que puede desgastar los equipos y disminuir la eficiencia de todo el sistema. Esto explica por qué dos tambos similares pero con diferente metodología de recolección pueden tener una producción de biogás por tonelada de MS muy diferente, y se reflejará en la distinta presencia de inertes (cenizas) entre un efluente y otro.

- **Presencia de inhibidores**

Existe una gran cantidad de compuestos biológicos y/o químicos que en determinadas concentraciones pueden inhibir el proceso de biodigestión (Cuadro 2). Conocer su presencia es importante, sobre todo, cuando se quiere trabajar con efluentes o residuos urbanos que pueden tener altas concentraciones de químicos propios de la actividad humana, inhibidores de los procesos biológicos. En nutrición animal, por ejemplo, especialmente en las dietas del ganado vacuno, se emplean enzimas para mejorar la eficiencia en la conversión de alimento a carne. Si estas enzimas llegan al estiércol que se destina a un biodigestor pueden provocar que la producción de biogás no sea la esperada.

- **Relación carbono/nitrógeno**

La relación carbono/nitrógeno (C/N) expresa la proporción entre esos componentes en un sustrato orgánico. Ambos elementos son claves para la vida y participan en todos los procesos biológicos, directa o indirectamente. El carbono es la fuente de energía, mientras que el nitrógeno es usado por los microorganismos para la regeneración y el crecimiento celular. Como un biodigestor es un sistema vivo, esta proporción es importante para la actividad microbiana.

En función del tipo de material orgánico que alimenta al biodigestor, la relación C/N puede no ser la mejor para que los procesos biológicos ocurran,

lo que disminuirá la eficiencia del sistema. Los rangos óptimos dentro del biodigestor van de 20:1 a 30:1. En sustratos como el guano de gallina, la relación puede ser muy baja, debido a la gran cantidad de N que contiene. También puede ser baja en el estiércol de vaca si estuvo mucho tiempo expuesto a una degradación aeróbica antes de ingresar al biodigestor. En otros casos, la relación es demasiado alta porque hay poco N (Cuadro 3).

Para cada caso existen alternativas que permiten mejorar la relación C/N hasta llevarla a los rangos necesarios para que el proceso se desarrolle eficientemente: desde reducir la cantidad de N mediante distintos métodos de volatilización y/o precipitación, hasta mezclar diferentes sustratos para lograr una mezcla óptima, lo que se denomina codigestión.

- **Relación ácidos orgánicos volátiles/ carbonato inorgánico total**

El Centro Federal Alemán de Investigación Agrícola (*Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft – FAL*) desarrolló el análisis de ácidos orgánicos volátiles (FOS) y carbonato inorgánico total (TAC) a partir de un test de valoración (Método Nordmann), con el fin de determinar el cociente de la concentración ácida y la capacidad compensadora del sustrato de fermentación. La relación FOS/TAC se mide en miligramos de carbonato de calcio por litro (mg CaCO₃/l). Este parámetro de control sirve como valor guía para evaluar el proceso de fermentación. Permite detectar a tiempo los problemas, hasta el inminente vuelco de la fase biológica del digestor, con lo que pueden tomarse contramedidas inmediatamente (Cuadro 4).

Cada planta tiene su propio valor óptimo de FOS/TAC, que sólo puede determinarse mediante una observación de largo plazo y controles regulares, puesto que existe una fuerte dependencia del sustrato. En general, una relación FOS/TAC de 0,3 a 0,4 se considera normal.

Codigestión e identificación de las materias primas

La codigestión, como se indicó, consiste en la mezcla de dos o más sustratos para su transformación

en un biodigestor. Permite regular algunos parámetros, como el pH, la relación C/N, la relación FOS/TAC y otros, y eficientizar al máximo el proceso fermentativo, con una mayor producción de biogás por cantidad de sustrato. Además, si se considera el biodigestor como una planta de tratamiento, la codigestión permite mejorar el procesamiento de un determinado efluente; si se lo piensa como una fábrica de biofertilizantes, cuanto más eficiente sea el proceso, mejores nutrientes producirá.

A nivel mundial, numerosos sistemas de producción de biogás se basan en el tratamiento de efluentes provenientes de sistemas pecuarios, agroindustrias o cloacales. Como esos residuos son sustratos que ya fueron procesados por un sistema digestivo, su potencial de producción de biogás es significativamente inferior al de sustratos vírgenes. Por este motivo, en muchos casos se busca mezclar los efluentes con sustratos ricos en energía.

En las grandes plantas de biogás resulta común encontrar codigestión entre residuos de agroindustrias (como porcinas, bovinas, avícolas) y cultivos energéticos (como silaje de sorgo o maíz). Sin embargo, hoy, frente al debate de si es mejor sembrar tierras para hacer energía o para producir alimento, se han comenzado a emplear otros sustratos ricos en energía y aptos para ser considerados codigestores, como los subproductos con escaso valor comercial o desperdicios de algunas industrias, como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), los residuos de las industrias alimenticias y otros.

En síntesis, la codigestión es otra herramienta que sirve para romper barreras e integrar producciones, con varios beneficios:

- Optimiza los procesos de biodigestión.
- Mejora la degradabilidad de los sustratos.
- Aumenta la cantidad de biogás por unidad de material.
- Perfecciona la calidad de los biofertilizantes.
- Integra producciones.

Cuadro 2. Ejemplos de inhibidores y concentraciones inhibitorias

Inhibidores	Concentración inhibitoria
SO ₄	5 000 ppm
NaCl	40 000 ppm
Nitrato	0,05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200-500 mg/l
CN	25 mg/l
ABS (detergente sintético)	20-40 mg/l
Na	3 500-5 500 mg/l
K	2 500-4 500 mg/l
Ca	2 500-4 500 mg/l
Mg	1 000-1 500 mg/l

Fuente: Ferrero *et al.* (2008).

Cuadro 3. Relación carbono/nitrógeno (C/N) de algunos sustratos

Sustrato	C/N
Excretas bovinas	25:1
Excretas equinas	50:1
Excretas ovinas	35:1
Excretas porcinas	16:1
Paja de trigo	87:1
Rastrojo de maíz	53:1
Hojas secas	41:1
Mezcla de gramíneas follaje abundante	10:1
Mezcla de gramíneas follaje en plena floración	20:1
Mezcla de gramíneas follaje maduro	50:1
Fardo de alfalfa	16:1
Vísceras de frigorífico	15:1
Harina de sangre	3-10:1
Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (RSU)	11-30:1

Fuentes: Dalzell *et al.* (1991); Schuldt y Belaustegui (1996); Varnero y Arellano (1990).

Cuadro 4. Reglas empíricas para la evaluación de relaciones FOS/TAC

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

Fuente: Lossie y Pütz (2008).

- Reduce los costos en tratamientos al unificar los mismos en un solo proyecto.

2.3 Tipos de biodigestores

Los biodigestores pueden tener tecnologías muy variadas, que incluyen desde construcciones caseiras con diversos materiales, hasta plantas con tecnología de punta completamente automatizadas. ¿Cuál es mejor?

La realidad es que no existe una tecnología mejor que otra, sino tecnologías que se adaptan mejor a una situación que otras, y su elección depende del objetivo que se persiga, de los recursos de que se disponga, del dinero y tipo de financiamiento para realizar la inversión, y de la clase de sustrato que alimentará al biodigestor, entre los aspectos más relevantes.

No hay una forma estandarizada de clasificar los biodigestores. En algunos casos se los diferencia por su tamaño, en otros por algunas características, en otros, por su nivel tecnológico. Estas dos últimas variables serán las más significativas en la presente guía.

En relación con sus características, los biodigestores pueden diferenciarse por la modalidad de carga, el contenido de materia seca de la mezcla de alimentación, el grado de mezclado, el manejo del sustrato y las etapas del manejo.

- Carga: puede realizarse completa en una única vez (*batch*) o administrarse de manera semi-continua o continua.
- Contenido de materia seca de la mezcla: define si los digestores se consideran húmedos, semi-húmedos o secos.
- Grado de mezclado: permite distinguir entre mezcla completa, mezcla parcial o nula
- Manejo del sustrato: hay digestores que lo hacen y otros que no.
- Etapas del manejo: en los casos en que hay manejo, puede ser de una o dos etapas.

Respecto del nivel de tecnología de los biodigestores, cuando se lo caracteriza como bajo, medio o alto, lo que se evalúa es la posibilidad de

controlar el grado de mezclado, la temperatura del proceso, la automatización y los sistemas de medición de la operación.

Independientemente de estas características, en todas las tecnologías de biodigestores hay aproximadamente entre un 20% y un 50% de volumen libre para el biogás.

A continuación, se describen algunos de los biodigestores más comunes.

Biodigestores en batch

Los biodigestores en *batch* normalmente se usan para investigación en laboratorios (Imagen 1). Se utilizan para conocer si un material es apto para producir biogás o no, cuánto produce y en qué tiempo, con lo que permiten determinar potenciales de producción de biogás de diferentes sustratos (Gráfico 4).

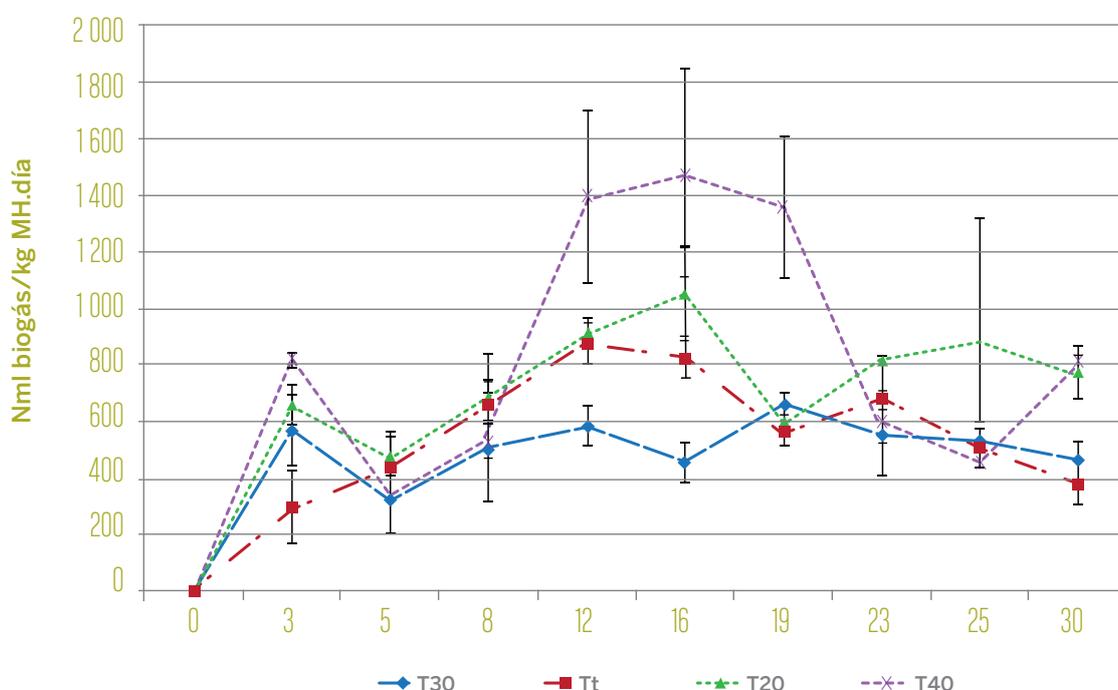
Pueden ser de distintos materiales y tamaños, pero en general son pequeños, lo que hace más fácil operarlos y manipular diferentes variables, como la agitación y la temperatura, sin grandes costos, lo que permite simular distintos escenarios.

Estos biodigestores pueden ser de mezcla completa o parcial; húmedos, semihúmedos o secos, y con o sin manejo del sustrato.

Imagen 1. Biodigestores *batch*.



Gráfico 4. Curvas de producción de biogás en ensayos con diferentes proporciones de silaje de maíz y estiércol de oveja como inóculo



Referencias: Tt: estiércol ovino 100%; T20: estiércol ovino + 20% silaje de maíz; T30: estiércol ovino + 30% silaje de maíz; T40: estiércol ovino + 40% silaje de maíz.

Fuente: Della Vecchia (2010).

En los biodigestores *batch* normalmente se realiza una carga y vaciado total en cada proceso, y se utiliza una proporción de inóculo, que suele ser de entre 20 y 50% de la mezcla a digerir. El inóculo no es otra cosa que una fuente originaria de microorganismos metanogénicos que sirven para dar arranque a la reacción. Los efluentes de sistemas pecuarios casi siempre los contienen, pero otros sustratos no, por ello, la proporción en la mezcla varía de acuerdo al tipo de ensayo y al sustrato.

Como inóculos se utilizan digeridos provenientes de otro biodigestor en funcionamiento, lodos de lagunas de tratamiento de efluentes o estiércol de animales, especialmente rumiantes o cerdos.

Con estos sistemas se realiza el Test de Potencial Biometanígeno (BMP), según la metodología de la norma UNI EN ISO 11734.

Biodigestores semicontinuos o continuos húmedos sin manejo del sustrato

Estos biodigestores abarcan los sistemas que trabajan con un contenido de materia seca de entre 1 y 17% en la mezcla. Esta puede ser nula, parcial o completa, en función del nivel tecnológico. Pueden ser de distintos tipos:

- **Biodigestores rurales de baja tecnología**

Los biodigestores domiciliarios rurales se caracterizan por no disponer de sistemas de agitación continua. Algunos incorporan algún tipo de mezcla manual (mediante manivelas o palancas), mientras que otros utilizan la misma carga diaria del biodigestor para generar agitación (por ejemplo, los tubulares o lagunas con flujo a pistón).

En la mayoría de los casos, estos reactores no cuentan con un sistema de calefacción, por lo que la temperatura del proceso depende de la exterior. Sin embargo, el biodigestor se puede aislar de diversos modos para garantizar una temperatura constante dentro. Existen experiencias de biodigestores rurales económicos funcionando en el Altiplano de Bolivia, que pese a que la temperatura externa desciende por debajo del umbral de tolerancia de los microorganismos metanogénicos (<10 °C), logran mantenerse en niveles que permiten que la digestión prosiga.

Dentro de este tipo de sistemas puede hacerse una subclasificación:

- Biodigestores tubulares, o taiwaneses, o flexibles

Muy difundidos en Taiwán, son fabricados con diferentes tipos de membranas. Estas pueden variar en cuanto a tipo de material, grosor, costo y características. Las más conocidas son las de polícloruro de vinilo (PVC), etileno propileno dieno tipo M (EPDM) o polietileno de alta densidad (PDA).

Por lo general, son tubos largos, que pueden ir enterrados o sobre el piso (Imagen 2). Esta característica alargada permite que, cuando se carga, toda la masa de líquido dentro del biodigestor se mueva hacia la salida, lo que provoca que la misma

carga constituya una forma de agitación, como se mencionó anteriormente.

Una particularidad de estos biodigestores es que son de fácil instalación y movilidad: uno de varios metros cúbicos se puede transportar, enrollado, en la caja de una camioneta.

En estos sistemas es importante tener en cuenta el grosor de la membrana que se utilizará, que no debería ser inferior a 0,80 mm, y el tipo de material y aditivos empleados en su fabricación, que sean resistentes al ataque químico y los rayos ultravioleta (UV).

- Biodigestores chinos o rígidos

Están hechos con materiales rígidos, como tanques de plástico, ladrillo, hormigón o cualquier variante. Tienen como ventaja una estructura más firme y a veces más resistente, que en muchos casos permite acoplar sistemas de agitación sin mayor dificultad (Imagen 3). Pero se tienen que construir en el lugar y su transporte puede ser dificultoso debido al tamaño.

Estos biodigestores presentan una variedad de medidas tan amplia como la de los tanques que se pueden hacer. Para cada alternativa de tecnología y materiales existe una gran cantidad de posibilidades, de acuerdo con la creatividad de cada constructor y al diseño, y esto puede observarse en las

Imagen 2. Biodigestor construido con membrana de PVC



Imagen 3. Biodigestor tipo chino



variaciones posibles de la forma del piso, si tiene campana incorporada, algún sistema de agitación, entre otras variables. En el Anexo se presentan con más detalle algunas alternativas para la construcción de biodigestores domiciliarios.

- **Biodigestores de laguna cubierta de media-baja tecnología**

En este grupo se ubican los biodigestores contruidos a partir de lagunas de tratamiento de efluentes, que en muchos casos se cubrieron con membranas para captar el biogás y así aprovechar la biodigestión anaeróbica (Imagen 4). Estas lagunas suelen ser grandes y con poco o nulo sistema de agitación. No presentan sistema de calefacción ni aislación del medio, por lo que su eficiencia depende mucho de las temperaturas externas y/o de la temperatura con que ingresan los efluentes. En la mayoría de los casos tampoco disponen de sistemas de medición y control para un seguimiento de la eficiencia del proceso.

Si bien las cantidades de biogás que pueden generar estos sistemas son altas, expresadas en metros cúbicos normales de biogás por día (Nm^3 biogás/día), esto se debe a las grandes dimensiones de esas lagunas anaeróbicas y los volúmenes de efluentes orgánicos con los que trabajan, y no a la eficiencia del proceso, que por lo general es baja, expresada en tasa de degradación de demanda química de oxígeno (DQO) y/o metro cúbico normal de biogás por tonelada de sustrato (Nm^3 biogás/t sustrato).

Estos biodigestores funcionan mejor en zonas tropicales, donde la temperatura interna no desciende por debajo de los 10°C ; en zonas templadas, funcionan bien cuando el efluente desechado por la industria viene a temperaturas superiores a los 30°C debido al proceso agroindustrial previo. En estos casos, se logra generar un medio mesofílico en el interior de las lagunas.

- **Biodigestores de mezcla completa de media-alta tecnología**

En Tailandia, en la década de 1990, aprovechando las ventajas climáticas y la estructura del suelo, se

Imagen 4. Biodigestor laguna anaeróbica de media-baja tecnología



desarrolló un modelo de biodigestores que buscaba mantener altas eficiencias de producción de biogás, reduciendo al mínimo los costos de inversión. La planta piloto que se había instalado en 1988, en el marco de un programa de cooperación entre Tailandia y Alemania con apoyo de la Agencia de Cooperación Alemana (GTZ), sirvió para que se propagaran en el país asiático decenas de biodigestores de tipo canal, una fusión entre lagunas y biodigestores tubulares, pero con control de variables como la agitación y el mezclado, y con la aislación necesaria como para mantener un proceso mesofílico eficiente. En 2016 se contabilizaban más de 150 plantas de biogás y una capacidad instalada mayor a 400 MW (GIZ, 2017).

- **Biodigestores de mezcla completa de alta tecnología**

Son biodigestores que permiten trabajar en cualquier rango de temperatura (psicro-, meso- y/o

termofílico), bajo cualquier condición climática, con altas cargas tanto de sólidos como orgánicas para maximizar la eficiencia del proceso.

Se construyen con hormigón armado, acero al carbono y/o acero inoxidable (Imagen 5). En cualquier caso, se tiene que garantizar que el material esté tratado correctamente para resistir el ataque químico que produce el biogás.

Este tipo de biodigestores permite garantizar una producción de biogás y, consecuentemente, de energía térmica y/o eléctrica constante las 24 horas del día los 365 días del año. Su vida útil se estima en 15 a 20 años, lo que permite firmar contratos de largo plazo de suministro de energía eléctrica a la red.

La desventaja de estos sistemas es que requieren una inversión significativa, en el orden de los 3 500 a 5 000 USD/kW eléctrico instalado, dependiendo de la escala y los tipos de sustratos a utilizar.

Biodigestores semicontinuos o continuos húmedos con manejo del sustrato

- Biodigestores para efluentes líquidos con altas cargas orgánicas

En la década de 1970, en Holanda, gracias al trabajo del doctor Gazte Lettinga, se crearon los reactores UASB o RAFA, que operan bajo régimen continuo, donde el afluente ingresa por la parte inferior y sale por la superior después de haber recorrido todo el perfil longitudinal (Imagen 6). Son más altos que anchos, lo que permite lograr un buen recorrido ascendente (Gráfico 5).

La velocidad a la que asciende el efluente en el reactor no debe ser ni muy rápida, porque removería toda la materia orgánica y a los microorganismos del reactor, ni muy lenta, porque provocaría la precipitación de todos los sólidos en un lodo difícil de tratar. Dicha velocidad ascensional se encuentra

Imagen 5. Biodigestor mezcla completa de alta tecnología



en un rango con máximos de hasta 1,0-1,5 m/hora y mínimos de hasta 0,4-0,6 m/hora.

Con la velocidad adecuada, las bacterias comienzan a juntarse, formando glomérulos y flóculos que no salen del reactor, con lo que logran una alta eficiencia de tratamiento al mismo tiempo que se genera biogás. Este es captado gracias a desviadores y/o deflectores que lo encauzan en la parte superior del reactor. A esta columna de materia orgánica con bacterias floculadas y en glomérulos se la denomina "manto de lodos".

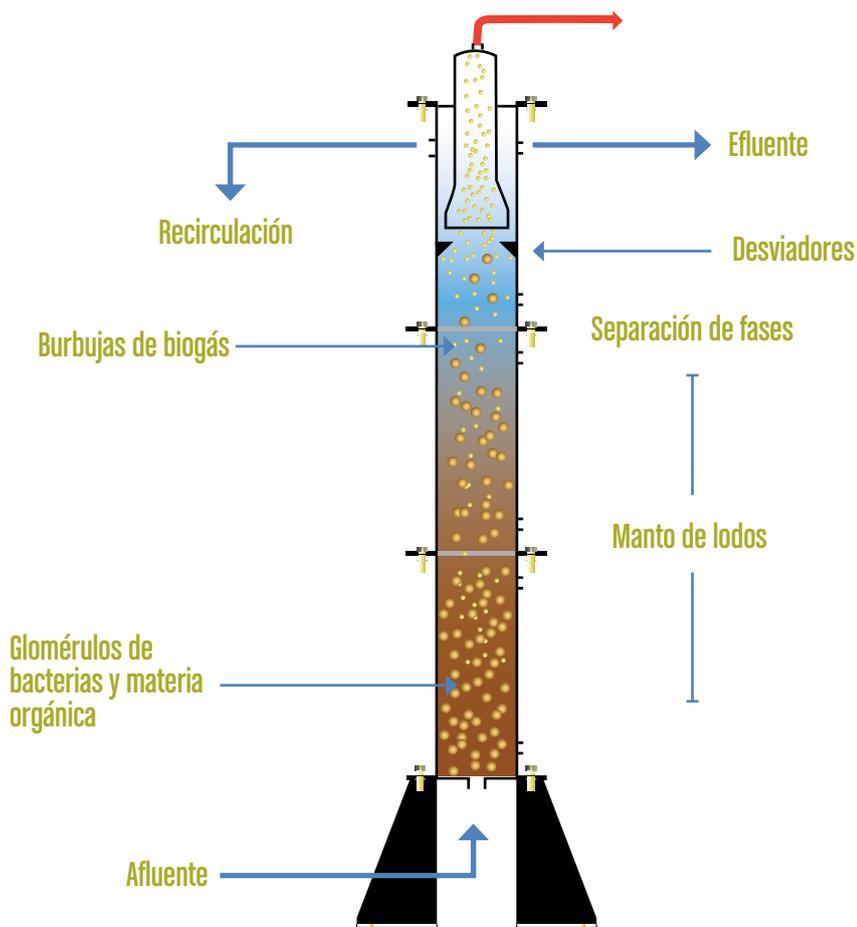
Esta tecnología permite una gran reducción de la DQO de los efluentes orgánicos muy diluidos, con porcentajes de materia seca inferiores al 1%

en la mezcla. Estos biorreactores logran reducir enormemente el TRH, llevándolo de días a horas. En consecuencia, su volumen se reduce significativamente.

De esta forma, resultan una alternativa muy eficiente para industrias que generan grandes cantidades de efluentes líquidos por día, con bajo contenido de sólidos y alto contenido de DQO, como aguas cloacales, de industrias de bebidas, queserías, industrias lácteas, malterías, entre otras.

La desventaja de estos biodigestores es que su puesta en marcha supone varios meses, tiempo necesario para crear un buen manto de lodos con bacterias anaeróbicas desarrolladas, en los casos

Gráfico 5. Esquema de reactor UASB



Fuente: Elaborado por los autores.

que no cuentan con el inóculo apropiado de otro reactor funcionando en condiciones similares. Además, al depender exclusivamente de la entrada continua de afluente para mantener el manto de lodos, cualquier mal funcionamiento en la carga o parada supone una caída del reactor y, por lo tanto, la necesidad de realizar una nueva puesta en marcha.

Es por esto que, con el tiempo, al diseño del UASB le siguieron alternativas como los biorreactores de lecho fluidizado y sus variantes, con estructuras que permiten la fijación de las bacterias anaeróbicas. De esta forma, no dependen únicamente del flujo de entrada para mantener el manto de lodos activo, con lo que se vuelven más flexibles frente a problemas hidráulicos y pueden mejorar los rendimientos y eficiencias del reactor.

Biodigestores semicontinuos o continuos húmedos en dos etapas

Este tipo de plantas de biogás se denomina “de dos etapas” o “de hidrólisis secuencial”.

Como se mencionó, en el proceso de biodigestión y producción de biogás intervienen distintos

organismos y el pH es una variable importante ya que los metanogénicos son muy sensibles a cambios en la acidez o alcalinidad del medio. Pero con pH neutro, como el de un biodigestor, muchos materiales, especialmente los fibrosos con altos contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina, no son aprovechados ya que poseen enlaces químicos muy fuertes, que no se rompen.

Por ello, existen tecnologías que hacen un pretratamiento ácido y logran aprovechar al máximo los beneficios de cada etapa y el desarrollo de bacterias específicas para cada estadio. Así, en una primera etapa, con pH entre 3,5 y 5,5, se mejora la digestión de carbohidratos como los mencionados, y la producción de biogás puede aumentar significativamente para un mismo sustrato, sobre todo aquellos ricos en fibras.

Biodigestores semicontinuos o continuos semihúmedos sin manejo del sustrato

Este tipo de biodigestores funciona con mezclas de alimentación que contienen entre 25 y 35% de materia seca. Son idóneos para trabajar con FORSU, con sustratos con bajo contenido de humedad o en zonas en las que no se cuenta con recursos hídricos para diluir las mezclas.

Hay distintos diseños de estos reactores, que pueden ser de flujo vertical y horizontal. Para el movimiento de la mezcla de alimentación y del digerido se utilizan bombas de tipo hormigoneras.

Estos sistemas tienen la ventaja de que son menos sensibles a la presencia de materiales inertes en la mezcla de alimentación y no producen espuma y/o costra en el interior del reactor. Si bien se reducen las cantidades de líquidos que se deben manipular con respecto a una planta de digestión húmeda, estos reactores deben contemplar algún sistema para separar el digerido sólido del líquido (prensa helicoidal y/o centrífuga), para su posterior utilización o tratamiento.

Biodigestores semicontinuos o continuos secos sin manejo del sustrato

Existen sistemas, normalmente denominados “bioceldas”, que sirven como biodigestores para sustratos con alto contenido de sólidos (hasta 50% MS).

Imagen 6. Reactor UASB



El proceso es muy similar al que ocurre naturalmente en los rellenos sanitarios, con la diferencia de que la fase anaeróbica se encuentra totalmente controlada, lo que eficientiza la producción de biogás por tonelada de sustrato. El THR para estos sistemas es aproximadamente de 28 días, con valores de 25 a 50% de MS.

El mayor desarrollo tecnológico se encuentra en los portones, que se abren para llenar cada compartimiento y luego se cierran, lo que garantiza la hermeticidad y la anaerobiosis dentro de cada reactor (Imagen 7). Por otro lado, es importante el manejo de los lixiviados, que se recirculan de modo de mantener el medio con la humedad óptima para el desarrollo de las bacterias metanogénicas. Luego del pasaje por las bioceldas suele realizarse un tratamiento aeróbico, a fin de terminar de estabilizar la materia orgánica para su uso.

Si bien estos sistemas tienen una menor eficiencia de producción de biogás comparados con los reactores húmedos o semihúmedos, presentan

ciertas ventajas que los vuelven apropiados para el tratamiento de FORSU en centros urbanos, entre otros sustratos:

- No necesitan sistema de agitación interna.
- Son robustos y resisten la presencia de inertes pesados y/o plásticos.
- No presentan cortocircuitos hidráulicos.
- Tienen baja pérdida de sustancia biodegradable durante el pretratamiento.
- Resisten picos de concentración de sustratos o sustancias tóxicas.
- Realizan pretratamientos mínimos y más económicos.
- Demandan agua en cantidad reducida en el proceso.
- Requieren calentar mínimamente el reactor anaeróbico.

Imagen 7. Nave interna con portones de bioceldas en planta de digestión seca



3. BIOGÁS Y DIGERIDO



Los biodigestores son reactores especialmente diseñados para maximizar la eficiencia de conversión de los sustratos en la energía del biogás, y obtener subproductos con valor agregado, como biofertilizantes.

3.1 Biogás

Composición química

La composición del biogás depende del sustrato que se utilice para alimentar el biodigestor, de la tecnología utilizada y de la temperatura de procesos. Los componentes principales son:

- Metano (CH_4): es un gas combustible que se encuentra con una concentración de entre 45% (a partir de la cual se considera que el biogás es inflamable) y 70% molar.
- Dióxido de carbono (CO_2): es el segundo gas más importante por su proporción. Su concentración varía en un rango de 25% a 45% molar.
- Sulfuro de hidrógeno (H_2S): es generado por microorganismos anaeróbicos reductores de sulfato ante la presencia de este, en cantidades que varían en función de la composición del sustrato utilizado para alimentar el biodigestor. Aún en muy bajas concentraciones, el H_2S es tóxico para humanos y animales, y altamente corrosivo: si no

es eliminado del biogás, provoca una drástica disminución de la vida útil de los equipos donde se emplea. En una muestra cruda de biogás, el valor de H_2S puede variar en un rango entre 5 000 y 50 000 partes por millón (ppm).

- Hidrógeno (H_2): normalmente, la concentración de este componente es inferior a las 5 000 ppm.
- Nitrógeno gaseoso (N_2): su presencia puede llegar a un máximo de 25% molar en biogases obtenidos de rellenos sanitarios; en sistemas con biodigestores, normalmente la concentración no supera el 5% molar.
- Oxígeno (O_2): el máximo valor que puede alcanzar en el biogás es de 5% molar.
- Agua (H_2O): es normal encontrar vapores de agua, especialmente cuando se trabaja con procesos termofílicos.

La composición del biogás es la que determinará su poder calorífico, es decir, la cantidad de energía por unidad de masa o unidad de volumen

de materia que puede desprenderse al producirse una reacción química de oxidación. El poder calorífico expresa la energía que puede liberar la unión química entre un combustible y el comburente. Si bien en realidad los combustibles tienen siempre un mismo valor de poder calorífico, en la práctica se han definido dos valores: poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI). El PCS expresa el calor verdaderamente producido en la reacción de combustión, mientras que el PCI es el calor realmente aprovechable, sin tener en cuenta la energía de condensación del agua y otros procesos de pequeña importancia.

El principal determinante del poder calorífico del biogás es la cantidad de metano que tenga en su mezcla. El PCI puede variar en un rango de 4 300 a 6 450 kcal/Nm³ (Deublein y Steinhäuser, 2008). Si bien es un PCI menor que el de otros gases, es suficiente como para usarse para calefacción, cocina, heladeras a gas, lámparas e incluso grupos electrógenos y microturbinas para la generación de energía eléctrica y/o térmica (cogeneración).

En el Cuadro 5 se muestra el PCI y el PCS de diferentes fuentes fósiles de energía.

Purificación

El biogás crudo puede combustionarse sin ningún tipo de depuración. Sin embargo, al margen del uso que se le dé al biocombustible, hay algunas

impurezas que deben eliminarse para garantizar la vida útil de todos los componentes, como el vapor de agua y el sulfuro de hidrógeno (sulfhídrico). En cuanto al biogás de rellenos sanitarios, será fundamental eliminar también los siloxanos para garantizar el rendimiento consistente de la maquinaria de uso habitual, como motores de combustión, calderas o turbinas. La remoción del CO₂ se justifica, únicamente, en los casos en los que se quiere obtener biometano, es decir, metano en una concentración de 84% o más (CH₄ ≥ 84%, Souza y Schaeffer, 2013) para inyectar a una red de distribución de gas natural o para gas natural vehicular (GNV).

Filtros y sistemas de purificación

• Eliminación de los vapores de agua

Existen distintas formas de eliminar los vapores de agua del biogás y evitar que impidan su utilización. En los biodigestores domésticos, los condensados de agua se eliminan conduciendo la cañería del biogás a trampas de agua ubicadas en diferentes puntos, que la retienen. No es común que cuenten con algún tipo de secado del biogás. En el Anexo se explican alternativas para la construcción de este tipo de sistemas.

En instalaciones industriales se utilizan sistemas para secar el biogás antes de su utilización, ya sea por compresión y/o enfriamiento del gas (*chiller*),

Cuadro 5. Poder calorífico de diferentes fuentes fósiles de energía

Fuente	Densidad	Poder calorífico inferior (PCI)		Poder calorífico superior (PCS)	
		kcal/l	kcal/kg	kcal/l	kcal/kg
Carbón mineral (Argentina)(*)	-	-	5900	-	6200
Fueloil	0,945	9261	9800	9923	10500
Gas natural (Nm ³)	-	8300	-	9300	-
Propano	0,508	5588	11000	6102	12013
Butano	0,567	6180	10900	6735	11878
Gas licuado	0,537	-	10950	6418	11951

* Sobre base húmeda.

Fuente: MEyM (2017).

adsorción en carbón activado o silica gel, o absorción en soluciones de glicol o sales higroscópicas. El método más utilizado, por la simplicidad en la operación y por su reducido costo operativo, es el de sistemas de enfriamiento (Imagen 8).

- **Eliminación del sulfuro de hidrógeno**

La eliminación del sulfhídrico, fundamental en cualquier instalación de biogás, puede realizarse por distintas vías. Las más utilizadas son:

- Agregado de cloruro ferroso o férrico con la alimentación del biodigestor: la utilización de sales metálicas compuestas principalmente de hierro permite evitar que el sulfuro se libere con el biogás por la formación de sales insolubles, que no afectan la biodigestión. La precipitación del sulfuro ferroso es un proceso rápido. El uso combinado de sales férricas y ferrosas genera una mayor eficiencia para controlar las concentraciones de sulfuro disuelto (Zhang *et al.*, 2008).
- Agregado de oxígeno: esta forma de eliminación de sulfhídrico es comúnmente utilizada en plantas de biodigestión agroindustriales por su eficacia, su reducido costo operativo y su bajo costo de inversión. Se basa en la adición de aire a una tasa de 4-6% del biogás, para permitir el

desarrollo de microorganismos aeróbicos que atacan el H_2S . Normalmente, la inyección se realiza en el mismo biodigestor. Como este método de purificación tiene un riesgo elevado de provocar explosión, la dosificación de aire tiene que ser limitada y controlada, y su concentración máxima puede ser del 12% del volumen de biogás (Zhang *et al.*, 2008).

- Filtros por absorción: se trata de columnas de purificación por donde se hace circular el biogás y, a contracorriente, se asperja una solución de hidróxido de sodio disuelta en agua. De esta forma, se logra eliminar el sulfhídrico a partir de la formación de sulfuro de sodio (Na_2S).
- Filtros por adsorción: el sulfuro de hidrógeno es adsorbido por superficies. Existen numerosos materiales que permiten este proceso de filtrado, como el carbón activado, algunos silicagel, tamices celulósicos orgánicos y limaduras de hierro. La desventaja de estos filtros es que dependen mucho de la humedad, la temperatura y la presión en el medio de filtrado. En el caso de los filtros de viruta de hierro, que son los más empleados en instalaciones domiciliarias, su eficacia es muy baja y, en volúmenes industriales de biogás, el costo de reposición es elevado.
- Filtros biológicos: son filtros en los que se desarrolla una biota capaz de remover el sulfuro de hidrógeno. Este proceso se basa en la oxidación microbológica del sulfuro a sulfatos o azufre elemental, fijando CO_2 simultáneamente como función estequiométrica de la oxidación del sulfuro (Soreanu *et al.*, 2008). Tienen la ventaja de que, bien manejados, pueden tener una vida útil casi ilimitada, con bajos costos operativos, permitiendo trabajar en diversas condiciones y sin generar un remanente contaminante del tipo "gas de cola" (Pérez Martínez *et al.*, 2008). Su desventaja radica en que el procedimiento es lento, y requiere un largo tiempo de puesta en marcha hasta que el filtro se colonice correctamente con los microorganismos deseados (Varnero *et al.*, 2012).

Imagen 8. Sistema *chiller*/enfriamiento para secado del biogás



- Eliminación de CO₂

En los casos en que el biogás se utiliza para inyectar en redes de distribución de gas o para sustituir GNV, es primordial realizar una purificación secundaria para eliminar la mayor cantidad de impurezas y obtener biometano.

A continuación y en el Cuadro 6 se describen las formas de remoción comúnmente utilizadas:

- Lavado químico: consiste en la formación de enlaces químicos reversibles entre el soluto y el solvente. Permite eliminar el CO₂ y el H₂S del biogás. Para esto se emplean soluciones acuosas de aminas, metildietanolamina (DMEA) o monoetanolamina (MEA), en concentraciones de entre 20 y 70% en peso de amina en agua (Kohl y Nielsen, 1997).
- Lavado con agua bajo presión: es una técnica sencilla, económica y eficiente, inclusive con bajos caudales de biogás. Se basa en el principio de solubilización del CO₂ en agua: la cantidad de este gas disuelto en agua aumenta a altas presiones y bajas temperaturas. El proceso de absorción es contracorriente. Con este sistema, el CO₂ y el H₂S se disuelven y salen por el fondo de la torre de lavado. El agua puede ser regenerada para ser reutilizada (Leitón, 2015).
- Adsorbimiento a presión oscilante (PSA): consiste en la adsorción de CO₂, H₂S, humedad y otras impurezas, en un adsorbente comercial, que consiste generalmente en sólidos granulares con grandes áreas superficiales por unidad de volumen. Por lo general, la adsorción se lleva a cabo a alta temperatura y presión. Tiene como inconvenientes que es un proceso costoso, con altas caídas de presión y altos requerimientos de calor (Kohl y Nielsen, 1997).
- Lavado físico con disolventes orgánicos: es comparable a la tecnología de lavado con agua y permite eliminar CO₂, H₂S, NH₃ y H₂O. El disolvente puede ser regenerado mediante una columna de desorción, para lo que se requieren temperaturas de -50 °C (Arellano-García *et al.*, 2017).
- Lavado químico con disolventes orgánicos: combina la fisisorción y la quimisorción. Si bien en la teoría este sistema permite eliminar H₂S, en la práctica se requiere una etapa de desulfuración del biogás antes de la columna de adsorción para evitar reacciones no deseadas en el proceso. La presión de trabajo de la columna es de pocos bares y para regenerar el disolvente se necesita un nivel de temperatura de 120 a 160 °C (Arellano-García *et al.*, 2017).
- Separación con membranas: data de la década de 1970, pero recién en los últimos años los avances importantes en la investigación de este campo justifican su implementación técnica y económica como uno de los mejores sistemas de purificación del biogás, compitiendo con las tecnologías de adsorción con oscilación de presión y la absorción química. Para lograr una pureza de CH₄>96% es necesario trabajar con temperatura controlada de biogás (45 °C) y presión controlada de alrededor de 8 bar (Monopoli, 2017).
- Separación criogénica: hace uso de bajas temperaturas, de alrededor de -90 °C, que combina con presiones altas, de aproximadamente 40 bares. El proceso permite licuar el CO₂, que, de esta manera, es fácilmente separado del biogás enriquecido. Esta tecnología permite alcanzar una pureza de hasta 99% de CH₄, obtener CO₂ líquido sin liberación a la atmósfera y procesar grandes cantidades de biogás de manera continua y eficiente. Sin embargo, tiene las desventajas de que requiere una gran cantidad de equipos (compresores, turbinas e intercambiadores de calor) y mucha energía para llevar a cabo el proceso. Esto eleva extremadamente los costos de inversión y de operación con respecto a otras tecnologías de obtención de biometano, aunque en los últimos años se realizaron avances significativos que la volverán una alternativa económicamente viable en el corto plazo (del Campo, 2017).

Cuadro 6. Comparación entre diferentes métodos de obtención de biometano

	Adsorción a presión oscilante (PSA)	Lavado con agua bajo presión (PWS)	Lavado químico (MEA, DMEA)	Lavado físico con disolventes orgánicos	Separación con membranas
Necesidad de purificación preventiva	Sí	No	No	No	No
Presión operativa (bar)	4-7	4-7	-	4-8	8
Pérdida de metano (%)	6-10	<2	<0,1	2-4	<2
Contenido de metano en el Biometano (%)	>97	>96	>96	>97	>97
Eficiencia total (%)	91	94	90	-	>95
Consumo de energía eléctrica (kWh/Nm ³ tratado)	0,25	0,40	0,12	0,24	0,17
Requerimiento de calor (°C)	No	No	160	55-80	-
Control respecto a la carga nominal (%)	±10-15	50-100	50-100	10-100	0-100

Fuente: Elaborado por los autores.

• Eliminación de compuestos minoritarios

- Siloxanos

Los siloxanos son un grupo de compuestos orgánicos que contienen un enlace sílice-oxígeno (Si-O) y radicales orgánicos (metil, etil y otros grupos orgánicos) unidos al átomo de silicio. En el biogás suelen encontrarse siloxanos lineales y cíclicos (Huppmann *et al.*, 1996; Beil y Hoffstede, 2010). Incluso en bajas concentraciones (<0,5 ppm), los siloxanos pueden causar daños significativos a los motores, turbinas y/o calderas: son componentes persistentes cuya concentración aumenta en el tiempo si no son eliminados. Para garantizar la vida útil de los equipos, es necesario monitorearlos y eliminarlos. En el Cuadro 7 se presentan los valores máximos de siloxanos admitidos en el biogás por diferentes fabricantes de equipos.

No existe un método universal de eliminación de siloxanos. Algunos de los procesos utilizados son los siguientes:

- Absorción con solventes orgánicos: se eliminan los siloxanos mediante absorción física empleando disolventes, con una eficiencia de remoción que puede ser superior al 97%. La desventaja de este sistema es que la eliminación completa es difícil de alcanzar (Schweigkofler y Niessner, 2001).
- Absorción química: como los siloxanos son estables a productos químicos y a la degradación, pueden emplearse bases fuertes o ácidos. El problema de utilizar bases fuertes es que con presencia de CO₂ en el biogás se forman carbonatos que precipitan, mientras que los ácidos (sulfúrico o nítrico) permiten una alta eficiencia de remoción. La tecnología tiene como desventaja que utiliza sustancias altamente corrosivas y peligrosas, cuestionables ambientalmente y que pueden ocasionar un daño importante en los equipos utilizados.

- Adsorción en materiales: para este proceso se utilizan diferentes materiales, como Tenax TA malla 60/80, Amberlite XAD II 20/malla 60, gel sílice 13X malla 45/60 y/o carbón activado (partículas de 2,5 mm malla 60/80). Estos procesos tienen una eficiencia de remoción alta. Los materiales de sílice tienen una capacidad de eliminación mayor que el carbón activado y pueden ser regenerados sometidos a 250 °C durante 20 minutos, mientras que el carbón activado tiene un poder de regeneración menor. Cualquiera de los materiales tiene la desventaja de que necesita alta presión y la eficiencia de remoción disminuye en función de la humedad contenida en el biogás.
- Separación criogénica: llevando la temperatura del biogás a -70 °C se logra una eliminación del 99,3% (Hagmann *et al.*, 2001).
- Adsorción en lechos regenerables: lechos activados de alúmina permiten eliminar los siloxanos del biogás. Estos sistemas pueden regenerar la alúmina activada una vez saturada con siloxanos, haciendo pasar un gas a través del lecho (Higgins, 2007).

La eliminación de los siloxanos del biogás dependerá de factores que deben tenerse en cuenta:

- Tipo de siloxano (conviene conocer la composición exacta).
- Contenido de humedad del biogás que será tratado.

- Oxígeno/aire

La presencia de oxígeno y/o nitrógeno indica que de algún modo ha entrado aire en contacto con el biogás. Esto sucede principalmente en rellenos sanitarios y/o en biodigestores donde se utiliza inyección de aire para purificación del sulfuro de hidrógeno. Es importante conocer la concentración de oxígeno ya que, dependiendo de la temperatura del biogás, una mezcla de aire entre 4 y 16% puede volverlo explosivo. El oxígeno puede ser eliminado con membranas o adsorción por oscilación a presión a temperaturas bajas. El costo de eliminarlo es elevado, por lo que se debe evitar la introducción de aire en el biogás con controles cuidadosos en la línea (Wellinger y Lindberg, 2001).

Cuadro 7. Niveles de siloxanos admitidos por fabricantes de equipos de uso de biogás

Uso de biogás	Fabricante	Siloxanos (mg/m ³)	Referencia
Calderas	-	NA*	Hingerl, 2011.
Biometano	-	Depende del uso final	
Motores de combustión interna	Jenbacher	10,00	Wheless y Pierce, 2004.
	Deutz	5,00	
	Caterpillar	28,00	
	Waukesha	25,00	
Microturbinas	Capstone	0,03	
	Ingersoll-Rand	0,06	

Fuente: Elaborado por los autores.

- **Almacenamiento del biogás**

La mayoría de los biodigestores y/o centrales de biogás se diseñan para consumir la producción diariamente, por lo que este se almacena a baja presión (<30 mbar), sin ningún tipo de compresión, para utilizarlo en cocinas, sistemas de calefacción, sistemas de iluminación, calderas para generación de vapor, generación eléctrica y/o cogeneración eléctrica-térmica.

El biogás se utiliza comprimido en los casos en que se inyecta como biometano a redes domiciliarias y/o transporte.

Es necesario, en toda línea de biogás, incorporar sistemas de seguridad que garanticen el buen funcionamiento de todos los equipos, de la salud humana y animal, y el cuidado del ambiente. Entre los principales problemas para tener en cuenta se encuentran los relacionados con sobrepresión y/o vacío.

Un biodigestor o una planta de biogás no deja de ser un sistema vivo, que no se apaga simplemente con un botón. Si hay un problema en la línea, o si por un período de tiempo se corta el uso de biogás, este comienza a acumularse dentro del biodigestor y en los sistemas de almacenamiento, con lo que la presión que ejerce empieza a incrementarse. También puede ocurrir que en el biodigestor se presente una fuga de líquidos, ya sea por un quiebre en su estructura o simplemente por el mal cierre de una válvula. Esta salida comienza a ejercer presión negativa en la cámara de aire, lo que provoca un vacío que, si no se compensa, puede llegar a tener graves efectos en la estructura de los biodigestores, especialmente en aquellos de gran tamaño. Para prevenir estos inconvenientes, es importante contar con sistemas de seguridad de sobrepresión y vacío.

La elección de los materiales es un factor determinante para la seguridad, ya que esta se ve muchas veces comprometida por el uso de elementos no apropiados, elegidos por su menor costo económico y no por su viabilidad técnica. En biodigestores piloto caseros los riesgos son menores, pero a medida que la escala del proyecto

aumenta, la mala elección de los materiales supone graves riesgos para el proyecto, para las personas que trabajan allí y para el ambiente, debido a los componentes altamente corrosivos del biogás y los efluentes dentro de un biodigestor, en su fase tanto líquida como gaseosa.

En proyectos domiciliarios, uno de los productos más usados son las cañerías de riego, por su costo económico, durabilidad y resistencia a los gases corrosivos propios del biogás. En muchos casos, por querer hacer instalaciones similares a las de gas natural, se utilizan cañerías con presencia de metales, que se corroen pronto, principalmente por la acción del sulfuro de hidrógeno.

En proyectos mayores, suelen utilizarse cañerías de acero inoxidable y de PEAD para la conducción del biogás.

- **Gasómetros (baja presión)**

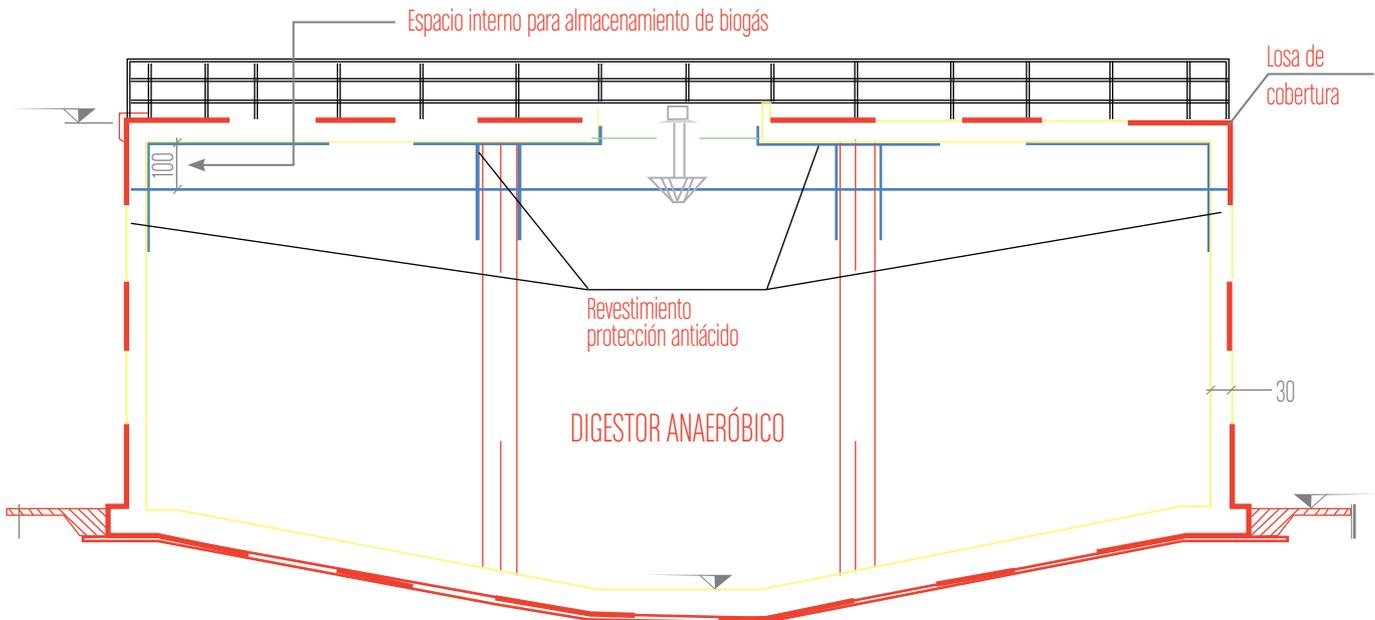
Comprimir el biogás crudo para utilizarlo posteriormente no es eficiente; para que lo sea, es necesario purificar el metano. Es por este motivo que para el almacenamiento del biogás a bajas presiones se utilizan gasómetros, cuya función es la de mantener una presión constante dentro del biodigestor y en la línea de consumo, equilibrando las fluctuaciones de la producción y los cambios de volumen. Con los gasómetros se logra, a un bajo costo, mantener la presión del biogás en un rango de 4 a 25 mbar. El volumen del gasómetro dependerá de la producción diaria y del consumo por hora de biogás.

Para el almacenamiento del biogás a baja presión existen diferentes tipos de sistemas, que se usan tanto a escala domiciliaria como industrial:

- **Cámara de biogás en el biodigestor**

Es el sistema más simple, almacena el biogás en el interior del biodigestor. El inconveniente, si no está asociado a algún tipo de gasómetro, es que no permite mantener constante la presión del biogás. El volumen de almacenamiento se dimensiona en base al consumo horario de biogás (Gráfico 6).

Gráfico 6. Cámara de biogás interna para almacenamiento



Fuente: Elaborado por los autores.

- Gasómetro de campana flotante

Estos sistemas son empleados principalmente en biodigestores domiciliarios, aunque en algunos casos se utilizan en centrales de biogás de escala industrial. La campana cumple la función de almacenar el biogás y mantener constante la presión hasta un máximo de 100 mbar, pero comúnmente en un rango de 15 a 30 mbar. Esta puede flotar sobre el mismo líquido en fermentación y/o construirse un sistema independiente con un recipiente que contenga agua. En ambos casos, el líquido funciona como sello hidráulico.

Los materiales empleados para la construcción de este tipo de gasómetros son plásticos reforzados con fibra de vidrio (PRFV), concreto y/o acero (Imagen 9). En cualquiera de los casos, es necesario que el material empleado esté protegido para resistir el ataque químico que produce el sulfhídrico del biogás.

Por medio de mecanismos que permiten lasstrar la campana flotante, se garantiza una presión constante al biogás almacenado, al margen de su volumen: la presión será establecida por el lastre utilizado.



Imagen 9. Diferentes tipos de gasómetros flotantes



- Gasómetro de doble membrana

Otro sistema utilizado para el almacenamiento del biogás a baja presión pero constante, al margen del volumen acumulado, es el de doble membrana. Este sistema puede estar montado sobre el biodigestor o en una platea de concreto independiente (Imagen 10). En cualquiera de los casos, está compuesto por una membrana exterior y una interior, de geotextiles de poliéster recubiertos con PVC: el material externo deberá resistir el ataque de los rayos UV y contar con retardante de llama; el material interno deberá ser resistente al ataque químico e impermeable al metano (Gráfico 7).

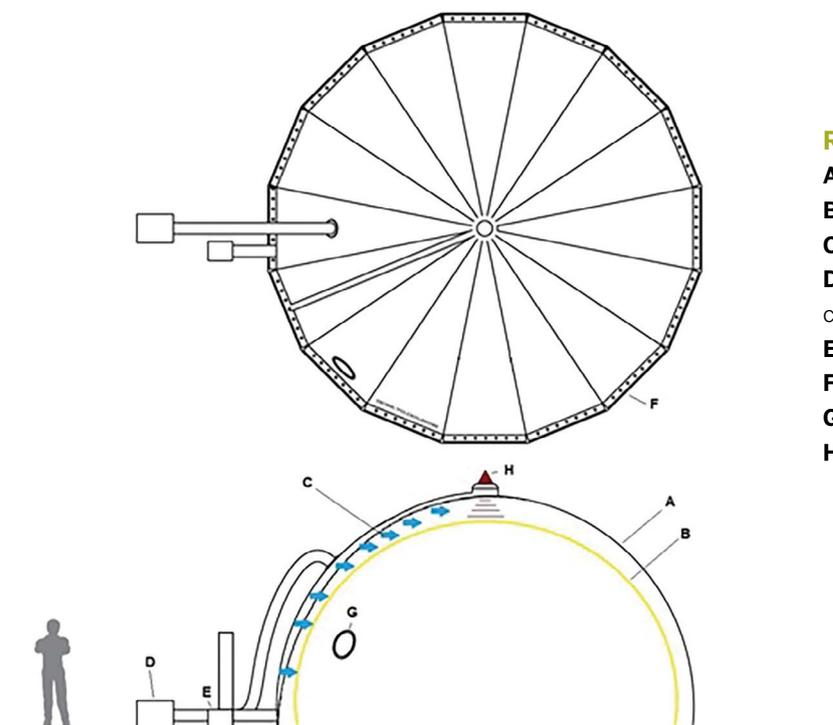
Estos gasómetros se basan en la creación de una cámara de aire entre la membrana exterior y la interior, en la que se ejerce una presión mediante un soplante que garantiza que la presión del biogás almacenado se mantenga constante.

Este sistema es de bajo costo operativo y fácil instalación. El problema que puede presentar si las membranas utilizadas no son adecuadas o el anclaje no está bien diseñado es que se deteriore fácilmente por la acción del viento o el granizo.

Imagen 10. Gasómetros de doble membrana, en platea de hormigón y sobre biodigestor



Gráfico 7. Vista aérea y corte transversal de un gasómetro de doble membrana y sus componentes



Referencias:

- A** Membrana externa
- B** Membrana interna
- C** Flujo de aire distribuido
- D** Soplador de aire con válvula de conservación de aire
- E** Sistema de seguridad de biogás
- F** Anillo de anclaje
- G** Visor
- H** Sensor ultrasónico de nivel

Fuente: IFES.

- **Almacenamiento de biogás en media presión**

Cuando se requiere almacenar el biogás para transportarlo o utilizarlo en determinados momentos, es necesario recurrir a la compresión y posterior almacenamiento. Para evitar la corrosión de los equipos compresores y los tanques de almacenamiento es preciso remover el sulfhídrico del biogás. La presión máxima de almacenamiento es de 14 bar y se utilizan los mismos tanques o depósitos que comúnmente almacenan gas propano. Si bien estos recipientes son menos costosos que los empleados para el almacenamiento a baja presión, los requisitos para la compresión y la limpieza del biogás hacen que el sistema sea más costoso si se cumple con las normas estándar de seguridad.

- **Almacenamiento de biogás licuado**

Para poder licuar el biogás a presión atmosférica es necesario utilizar temperaturas por debajo de los 50 °C, y se requiere trabajar con biometano ($\text{CH}_4 \geq 84\%$) para evitar la solidificación de CO_2 . Este sistema solo se puede implementar a escala industrial y se justifica en los casos en los que es conveniente obtener biometano licuado (BGNL) para utilizar en sistemas de gasoductos virtuales y/o vehículos de transporte pesados, o para recorrer largas distancias.

El BGNL podría ser una alternativa de suministro de fuente renovable a centrales eléctricas térmicas de gran potencia (≥ 15 MWe), que podrían abastecerse de diferentes plantas descentralizadas productoras.

Usos del biogás

El biogás puede ser utilizado con diferentes fines en un amplio espectro de equipos. Dado que su poder calorífico es menor al del gas natural o el gas licuado de petróleo, para la combustión es necesario realizar algunas adaptaciones en el equipamiento (salvo que se purifique para obtener biometano).

La combustión del biogás requiere un mínimo de aire de 21% en los equipos de gas natural o gas licuado de petróleo, y una modificación en la apertura de la válvula dosificadora de gas, para permitir un mayor caudal y modificar las entradas de aire, de modo de lograr una combustión eficiente.

- **Combustión directa**

El uso más simple que se le puede dar al biogás es la combustión directa en cocinas residenciales, calefones, heladeras rurales, lámparas de gas, pantallas de calefacción de galpones y/o calderas para generación de agua caliente o vapor. Para esto, solo se precisa eliminar el sulfhídrico y el vapor de agua.

En cocinas residenciales, calefones domiciliarios, heladeras rurales y/o lámparas de gas, basta con una presión de 7 mbar, lo que se logra a nivel domiciliario con los sistemas de gasómetros descritos anteriormente.

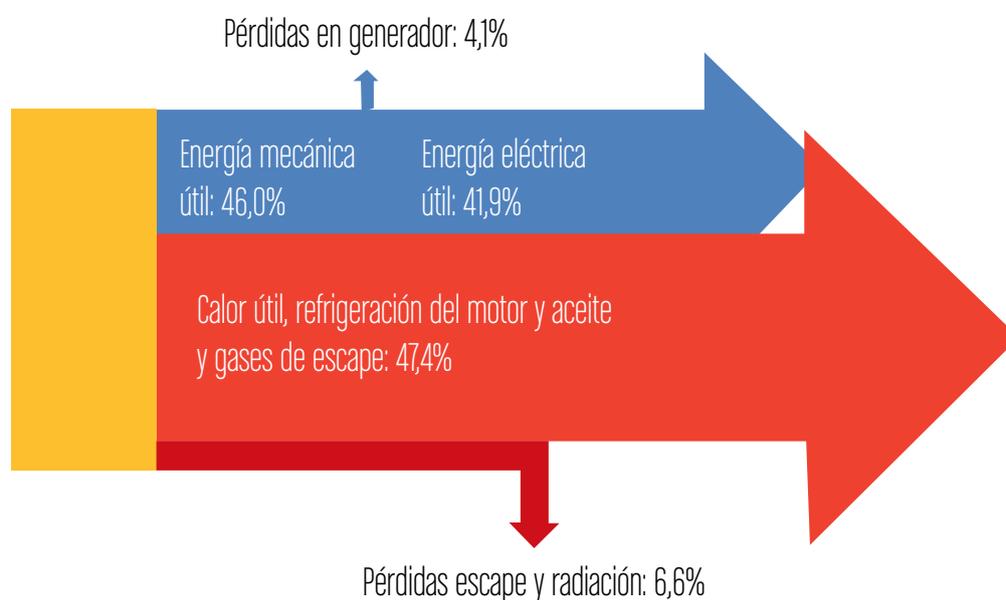
En el caso de calefacción de galpones zootécnicos y/o calderas industriales, será necesario utilizar equipos adicionales que garanticen una presión constante de alimentación al quemador del biogás. Para esto se utilizan sopladores de canal lateral y/o lobulares: estos equipos no comprimen el biogás pero logran aumentar la presión hasta por lo menos 200 mbar, y garantizan un caudal constante de alimentación al punto de consumo final. Los sopladores de canal lateral son empleados, comúnmente, para caudales por debajo de los 100 Nm^3 biogás/hora, mientras que los sopladores lobulares se usan en centrales de biogás que generan elevados caudales diarios de gas (Imagen 11). En ambos casos será necesario utilizar equipos que cumplan con las normas de seguridad para operar con gases combustibles.

- **Cogeneración eléctrica y térmica**

La forma más eficiente de utilizar el biogás en una central de generación es produciendo cogeneración eléctrica-térmica (CHP), ya que de este modo se logran eficiencias de hasta el 90% de utilización de la energía contenida en el biogás. En el Gráfico 8 se esquematiza este aprovechamiento en un cogenerador convencional, con una potencia nominal del motor de 519 kWe. Los sistemas de cogeneración permiten recuperar la energía que comúnmente se pierde en forma de calor en los motores de combustión interna; la recuperación se realiza del sistema de refrigeración del motor y aceite, y de los gases de escape.

Imagen 11. Soplador de canal lateral y sopladores lobulares



Gráfico 8. Eficiencia eléctrica y térmica de un cogenerador convencional

Fuente: Elaborado por los autores en función de las especificaciones técnicas de fabricantes.

Las unidades CHP más utilizadas son centrales térmicas compuestas por un motor de combustión acoplado a un generador síncrono, diseñados para trabajar a 1 500 revoluciones por minuto (rpm). Los motores utilizados pueden ser del tipo Gas-Otto o Gas-Diesel. Ambos deben operar bajo el principio del ciclo Otto, la única diferencia radica en la relación de compresión. Alternativamente, en los motores de combustión se pueden utilizar microturbinas o celdas de combustibles, como se explicará en los próximos apartados.

En una central de biogás que produce energía eléctrica para inyectar en la red, la utilización de CHP es fundamental para recuperar parte del calor y calefaccionar el proceso de biodigestión. Normalmente, un tercio del calor que se logra producir en una central CHP es utilizado para el autoconsumo del biodigestor, mientras que el resto se pierde en la atmósfera o puede usarse para algún proceso industrial. Esto dependerá de la proximidad de la central de biogás a una industria que requiera energía térmica, para generar calor o frío. En los

últimos años, muchos países que impulsaron la producción de biogás con *feed-in tariff* (incentivo en la tarifa por la energía eléctrica generada) han comenzado a premiar a aquellas plantas de biogás que recuperan el 100% del calor. Un ejemplo es Italia, en donde se estipula una tarifa base (euro/MWh) para todas las centrales de biogás, y a aquellas que realizan cogeneración se les aumenta en una cantidad fija de euros por MWh inyectado.

El calor recuperado en las centrales CHP puede emplearse con diferentes fines: calefacción domiciliar, generación de vapor, secado de granos, calefacción en complejos residenciales o turísticos, entre otros. Una alternativa muy conveniente es destinar el calor para refrigeración, con procesos de adsorción y absorción (Imagen 12). Estos equipos tienen menor desgaste y menor consumo de energía que los sistemas de refrigeración con compresores. En la Argentina, la Asociación de Cooperativas Argentinas (ACA) implementó este tipo de sistemas en el frigorífico porcino que está ubicado en la localidad de Justiniano Pose, en la provincia de Córdoba.

Imagen 12. Central de cogeneración de 1 MW de potencia eléctrica, con recuperación de calor de sistema de refrigeración y gases de escape



- **Generación eléctrica con motores Biogás-Otto**

Si bien tanto los motores que funcionan con nafta como los que funcionan con diesel pueden ser adaptados para hacerlo con biogás, es mejor utilizarlo en motores fabricados específicamente. De cualquier manera, a todos se los denomina Biogás-Otto, ya que su operación se basa en los principios del ciclo Otto.

En las centrales de baja potencia (≤ 300 kWe) es común que se empleen motores diesel o de nafta que las mismas fábricas adaptan para utilizar biogás, con una eficiencia eléctrica en general por debajo del 35% (Imagen 13). Por el contrario, cuando la potencia necesaria supera los 300 kWe, se utilizan motores diseñados y fabricados para trabajar con biogás, con mezcladores de gas específicamente configurados que permiten tener una alta densidad de potencia a una velocidad constante.

Al igual que cuando el biogás se usa para combustión directa, se trabaja a presión baja (≤ 80 mbar), empleando sopladores de canal lateral y/o lobulares para garantizar una alimentación del motor a presión constante. Estos equipos pueden funcionar con biogás con al menos 45% de metano, pero será fundamental que esté libre de agua y mantener la concentración de sulfhídrico por debajo de 200 ppm.

- **Generación eléctrica con microturbinas**

Estos equipos funcionan bajo el principio del ciclo Brayton (o Joule), que modela el comportamiento de turbinas como las de los aviones, y son una alternativa menos difundida que los motores Biogás-Otto para producir energía eléctrica y/o térmica a partir de biogás.

Las microturbinas consisten en un generador de energía acoplado a una turbina de gas y/o

Imagen 13. Motor Biogás-Otto instalado en central de biogás



© IFES

biogás a pequeña escala. El aire es comprimido e introducido en la cámara de combustión a alta presión y mezclado con el biogás; la mezcla combustiona, se expande y sale a través de la turbina. Normalmente, estos sistemas se utilizan en instalaciones con potencias inferiores a los 200 kWe.

Respecto de los motores Biogás-Otto de baja potencia, las microturbinas presentan ventajas: logran una mejor eficiencia eléctrica y térmica; tienen un tamaño y peso hasta 50% inferior; su costo de mantenimiento es muy bajo por tener solo una parte móvil; generan menos ruido y producen menos emisiones de óxido de nitrógeno (NOx). Por último, en caso de realizar cogeneración eléctrica-térmica, permiten una recuperación mejor del calor, ya que este solo se pierde a través de los gases de escape.

Las desventajas de estos equipos frente a los motores Biogás-Otto son su mayor costo de inversión, el requisito de comprimir el biogás a una

presión de 5 bar y la necesidad de técnicos altamente capacitados para realizar el mantenimiento y las reparaciones.

- **Generación eléctrica con celdas de combustible**

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que permiten convertir la energía de una reacción química en energía eléctrica. Están compuestas básicamente por tres partes: un ánodo, un cátodo y un electrolito (conductor iónico) ubicado entre ambos. El principio de funcionamiento es similar al de una batería, con la diferencia de que estas celdas están diseñadas para permitir el abastecimiento continuo de los reactivos consumidos.

Estos equipos permiten alcanzar eficiencias energéticas altas, con una conversión eléctrica de entre 40 y 60%, y pueden llegar a 85-90% cuando se realiza cogeneración para recuperación de calor.

En este tipo de sistemas, el biogás actúa como reductor y el aire como oxidante, para permitir la ocurrencia del proceso electroquímico. Como este proceso no implica la combustión de los reactivos, las emisiones contaminantes a la atmósfera son mínimas (Notter *et al.*, 2015): no se generan emisiones de NO_x, SO_x ni material particulado.

Hay diferentes tipos de celdas de combustibles aptas para biogás, que reciben su nombre en base al tipo de electrolito que utilizan:

- Pila de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM)

Las PEM operan a baja temperatura (80-95 °C), logran una eficiencia eléctrica de entre 40 y 60%, y permiten recuperar el calor para algún proceso industrial. El electrolito es una membrana de polímero sólido y el catalizador utilizado es platino. Este tipo de celdas es el que se usa comúnmente para vehículos. Dado que la membrana de polímero es muy sensible a las impurezas, incluyendo el dióxido de carbono, no es viable su empleo para instalaciones de biogás por el costo que significaría la inversión y la corta vida útil del equipo (Wang *et al.*, 2011).

- Pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC)

El electrolito utilizado es ácido fosfórico líquido y el catalizador es platino. La temperatura de operación está en un rango de 180 a 205 °C y la eficiencia eléctrica que se puede lograr varía entre 36 y 42%. Estas celdas de combustible son tolerantes al dióxido de carbono y pueden soportar hasta una concentración de 1,5% de monóxido de carbono, lo que permite su utilización con diferentes tipos de combustibles (EG&G Technical Services Inc., 2004). En el mercado hay equipos que se comercializan para generar en un rango de entre 100 y 400 kW de potencia.

- Pila de combustible de carbonato fundido (MCFC)

En este caso, los electrolitos utilizados pueden ser carbonato de potasio y litio, y la temperatura de operación ronda los 650 °C. Pueden lograrse eficiencias eléctricas de 50-60%. Una de las ventajas de estas celdas es que no son propensas a la contaminación con CO o CO₂, lo que permite utilizar biogás crudo.

El CH₄ es transformado dentro de la pila produciendo H₂ y CO₂. El combustible gastado sale del ánodo y se consume para suministrar O₂ y CO₂ al cátodo. Los productos del proceso son calor y H₂O (EG&G Technical Services Inc., 2004). Esta tecnología tiene varios años de desarrollo, y se comercializan celdas para generar desde 100 kWhe hasta 3700 kWhe.

- Pila de combustible de óxido sólido (SOFC)

Esta celda de alta temperatura trabaja en un rango de entre 750 y 1000 °C, y el electrolito es un sólido cerámico u óxido metálico no poroso. Este tipo de pila es el que mejor podría adaptarse en el futuro, dado que no requiere metales preciosos, ni ácidos corrosivos ni materiales fundidos. Adicionalmente, permite obtener una eficiencia eléctrica de entre 50 y 60%, y puede alimentarse con biogás.

Las celdas de combustible, todavía, no compiten económicamente con los motores Biogás-Otto, pero la investigación y desarrollo en este campo permitirá reducir los costos de los futuros equipos.

• Biometano

Como se ha señalado, para utilizar el biogás para inyección en redes de distribución de gas o como combustible vehicular es necesario convertirlo en biometano (CH₄ ≥ 84%). Normalmente, los requerimientos locales en los países que hoy promueven su uso (por ejemplo, Brasil, Italia, Holanda, entre otros) exigen una concentración de CH₄ superior a 92%, pero esto dependerá del punto de inyección y del destino final.

En base a datos relevados por EurObserv'ER (2014) e International Gas Union, en los países con mayor producción de biogás, más del 50% se usa para generar calor (principalmente en China, para autoconsumo en el medio rural) y entre 40 y 50% se destina a la generación de energía eléctrica.

Los países que más incentivaron la producción de biometano son Alemania, Países Bajos, Suecia, Suiza, Austria, Francia e Italia. Se estima que hay alrededor de 500 plantas de biogás que producen biometano en el mundo. El principal destino es la inyección a redes de gas, y en menor proporción se utiliza como combustible para vehículos. La obtención de biometano con inyección a la red permite almacenar la energía para luego utilizarla en

los momentos en que hay pico de demanda para transporte, calor o generar electricidad en turbinas de ciclo combinado con una eficiencia eléctrica de alrededor de 60 por ciento.

El principal desafío para la industria del biogás es lograr reducir el costo de purificación para volverlo competitivo frente al gas natural. Sin embargo, los beneficios que genera su utilización (reducción de emisiones de efecto invernadero, revalorización energética de residuos y/o efluentes líquidos, generación de nuevos empleos en zonas rurales, sustitución de fertilizantes sintéticos) han llevado a varios países a destinar incentivos económicos para promover la producción de biometano, tanto para inyectar en redes de distribución como para utilizar en vehículos, sustituyendo el gas natural.

La Argentina tiene un gran potencial para producir biometano, debido al desarrollo de la industria del gas natural comprimido (GNC) y la posibilidad de abastecer gasoductos virtuales en pueblos del interior del país. Adicionalmente, se podrían construir centrales de biogás encargadas de producir biometano y transportarlo hasta una central de generación de ciclo combinado de alta eficiencia.

3.2 Digerido

Propiedades del digerido

Generalmente, se sobreentiende que la principal función de los sistemas de biodigestión anaeróbica es producir energía renovable (biogás). Sin embargo, en muchos lugares, los biodigestores tienen como objetivo principal la obtención de biofertilizantes, debido al valor agronómico que le da el tratamiento físico-químico de la materia orgánica que se realiza durante el proceso.

El material orgánico que se obtiene en la salida de un biodigestor puede ser considerado un efluente en los casos en que su disposición final se realiza en un curso hídrico, y requiere un tratamiento secundario para cumplir con los parámetros de vertido que determina la autoridad de aplicación en cada sitio. En cambio, cuando el producto orgánico del proceso anaeróbico se usa con fines agronómicos, se denomina "digerido" (Bernal Calderón *et al.*, 2014).

El contenido de humedad del digerido depende del tipo de biodigestión anaeróbica (seca, semisecca o húmeda) empleado, mientras que la calidad y la cantidad de los nutrientes está directamente relacionada con el tipo de sustratos usados para alimentar el biodigestor. Cuando los digeridos tienen destino agronómico, es importante garantizar que en el proceso anaeróbico no se emplee agua o sustratos con concentraciones de metales pesados u otros tóxicos, que permanecen en el producto final de la digestión.

Como se señaló, en un reactor anaeróbico los microorganismos degradan la materia orgánica, lo que produce biogás y al mismo tiempo libera nutrientes y metabolitos al medio. Los biodigestores mesofílicos y termofílicos logran reducir en más de un 50% el contenido de materia seca de la mezcla utilizada para la alimentación, de lo que resulta un digerido con una materia orgánica microbiológicamente más estable que los materiales originales. Además, la acción de los microorganismos modifica la proporción de nitrógeno inorgánico disponible ($N-NH_4^+$) en relación con el nitrógeno total (orgánico + inorgánico), lo que permite una asimilación rápida por parte de los cultivos y/o su transformación en nitratos en el suelo. La porción asimilable del fósforo (P) no se ve significativamente afectada por el proceso, que preserva además micronutrientes esenciales para el desarrollo de los cultivos (Soria Fregoso *et al.*, 2001; Hilbert, J.A., 2010; Möller & Müller, 2012; Bernal Calderón *et al.*, 2014).

El uso agronómico de los digeridos permite sustituir parcial o totalmente el empleo de fertilizantes inorgánicos (urea, fosfato monoamónico y otros) y mejora las propiedades físico-químicas de los suelos por el aporte de materia orgánica. Adicionalmente, los digeridos contienen hormonas vegetales de crecimiento, que son desechos del metabolismo de los microorganismos típicos de este tipo de fermentación anaeróbica, ausentes en el compost. Los digeridos líquidos contienen los cinco grupos hormonales principales: adeninas, purinas, auxinas, giberelinas y citoquininas (Aparcana Robles y Jansen, 2008).

En el Cuadro 8, a modo de ejemplo, se presenta un análisis físico-químico del digerido obtenido

en una central de biogás que opera en la localidad de Pavia, Italia. Esta planta es alimentada diariamente con FORSU, y su proceso de digestión es húmedo en reactores de mezcla completa. Por el contrario, el digerido que se muestra en el Cuadro 9 es el obtenido en una central de biogás de digestión seca del tipo garaje. La Argentina es nueva en

esta materia, y las experiencias de otras partes del mundo son ilustrativas.

Almacenamiento del digerido

Para darle uso agronómico al digerido, es importante contar con un sistema de almacenamiento que permita utilizarlo en los períodos de mayores

Cuadro 8. Composición físico-química del digerido de central de digestión húmeda con FORSU. Pavia, Italia

Parámetro	Unidad	Método	Resultado	Límite máximo
pH	Unidad pH	CNR IRSA 1 Q64 Vol 3 1985	8,3	-
CE	MS/cm	DIVAPRA IPLA ARPA C 5.1 Coll. Ambiente 6:1992	2,5	-
Materia seca 105 °C	% BS	CNR IRSA 2 Q64 Vol 2 1984	2,2	-
Cenizas 600 °C	% BS	CNR IRSA 2 Q64 Vol 2 1984	0,6	-
C orgánico de origen biológico	% BS	DIVAPRA IPLA ARPA C 6.1 Coli. Ambiente 6:1992	28,1	-
C orgánico extraíble	% BS	DIVAPRA IPLA ARPA : 1992	27,7	-
Nitrógeno total	% BS	DIVAPRA IPLA ARPA C 7.3 Coll. Ambiente 6:1992	15,4	-
Fósforo total	% BS	CNR IRSA 10 Q 64 Vol 3 1985 + APAT CNR IRSA 3020 Man 29 2003	0,3	-
Potasio	g/kg BS		104	
Arsénico	mg/kg BS		<1,0	10
Cadmio	mg/kg BS		<1,0	20
Cromo	mg/kg BS		296	750
Cromo hexavalente	mg/kg BS		<1,0	10
Mercurio	mg/kg BS		<1,0	10
Níquel	mg/kg BS		251	300
Plomo	mg/kg BS		34,0	750
Cobre	mg/kg BS		71,7	1000
Sodio	mg/kg BS		81136	
Zinc	mg/kg BS		124	2500
Salmonela	MPN/g BS		UNI EN ISO 6579: 2008	Ausencia
Huevos helmintos viables	Unidad/g BS	MPI 180 – rev. 03/09	Ausencia	0

Fuente: Elaborado por los autores.

Cuadro 9. Composición físico-química del digerido de central de digestión seca con FORSU. Múnich, Alemania

Parámetro	Unidad	Resultado
Materia seca 105 °C	% BH	58,0
Materia orgánica	% BS	41,7
Partículas extrañas >2 mm (total)	% BS	0,13
Piedras >5 mm	% BS	4,75
Nitrógeno total (N)	% BS	1,50
Fósforo total (P ₂ O ₅)	% BS	0,85
Potasio total (K ₂ O)	% BS	1,50
Magnesio total (MgO)	% BS	1,94
pH	CaCl ₂	8,0
Salmonela	MPN/g BS	–
Plomo	mg/kg BS	34,4
Cadmio	mg/kg BS	0,49
Cromo	mg/kg BS	18,7
Cobre	mg/kg BS	81,3
Níquel	mg/kg BS	11,1
Mercurio	mg/kg BS	0,09
Zinc	mg/kg BS	194

Fuente: Elaborado por los autores.

requerimientos de nutrientes de los cultivos, y, de este modo, evitar que estos se pierdan por volatilización y/o lixiviación.

El material obtenido del proceso de digestión anaeróbica puede ser utilizado tal cual o separarse en una fracción sólida y otra líquida. Esto dependerá del destino final que tenga el producto y los sistemas con los que se aplique.

Para los digeridos tal como salen del reactor o para su fracción líquida, los sistemas de almacenamiento deberán garantizar estanqueidad, para evitar la percolación de líquido al suelo y/o cursos

de agua subsuperficiales o superficiales. Los sistemas de almacenamiento pueden ser tanques de hormigón armado y/o acero pintado, o lagunas impermeabilizadas con geomembranas; en cualquier caso, deberían utilizarse materiales que por lo menos garanticen una vida útil de 10 años sin roturas (Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali, 2016).

Para dimensionar los reservorios del digerido, se deberá considerar un tiempo prudencial que dependerá de la ubicación geográfica, el tipo de suelo, el clima, el cultivo al que va a ser adiciona-

do y la legislación vigente, que regula los períodos de almacenamiento antes de su aplicación (principalmente en los países donde hay una temporada con nieve, cuando se prohíbe su utilización). En las centrales de biogás, se suelen utilizar entre 3 y 6 meses para dimensionar las lagunas de almacenamiento del digerido.

En cuanto a la estabilidad del digerido, es importante evitar las pérdidas de nitrógeno por volatilización durante el almacenamiento. Estas se producen cuando los valores de pH del producto son superiores a 8,0, las temperaturas son elevadas (>20 °C) y el reservorio no es cubierto. Tales condiciones facilitan la volatilización de nitrógeno en forma de amoníaco. Para evitar estas pérdidas, es recomendable recurrir a las siguientes soluciones:

- Cubrir los reservorios para capturar metano/amoníaco.
- Formar una costra superficial (esto puede ocasionar problemas operacionales) (Imagen 14).

- Utilizar biodigestor frío posfermentación mesofílica y/o termofílica.
- Proteger con sombra el reservorio.

En el caso de la fracción sólida del digerido, deberá almacenarse en platea impermeabilizada, con cierto grado de pendiente que permita la recolección de percolados. El tamaño de la platea dependerá de los mismos factores considerados para el dimensionamiento de los reservorios de la fracción líquida.

La separación de la fracción sólida y líquida del digerido puede realizarse con diferentes tecnologías:

- Lechos de secado
- Separadores rotativos
- Separadores helicoidales (Imagen 15)
- Separadores gravimétricos
- Centrífugas

Imagen 14. Exceso de costra superficial en reservorio de digerido en central de biogás



Imagen 15. Segregación de fracciones líquida y sólida con separador helicoidal. Almacenamiento de la sólida



La elección de la tecnología dependerá del nivel de inversión, la disponibilidad de espacio, la cantidad de digerido que se debe tratar, el porcentaje de sólidos, el tipo y tamaño de estos. Los lechos de secado son los sistemas más económicos en cuanto a la inversión inicial y al costo operativo, pero tienen la desventaja de que requieren una gran superficie y su eficiencia depende de factores meteorológicos. Los separadores helicoidales son los sistemas comúnmente utilizados en centrales de biogás que trabajan con digeridos con un porcentaje de materia seca superior a 3% y con presencia de partículas sólidas de tamaño mayor a 20 mm. Estos equipos tienen una alta eficiencia de operación y un bajo costo operativo. En el otro extremo se encuentran los sistemas de centrifugas, que permiten realizar la separación entre sólidos y líquidos en digeridos que tienen pequeño tamaño de partículas (coloidal) pero logran altas eficiencias de separación al utilizar floculantes y polielectrolitos. El costo operativo de estos es sumamente elevado por el consumo de químicos que requieren, pero son la mejor alternativa cuando se trabaja con digerido de bajo contenido de

fibra y no se dispone de suficiente espacio para lechos de secado.

Utilización agronómica del digerido

Como se explicó anteriormente, la calidad y composición de los digeridos dependerá del tipo de digestión anaeróbica implementada, de los sustratos utilizados para la alimentación del digestor y del postratamiento que se realice (separación sólido/líquido, nitrógeno/denitrógeno, etc.). Para poder utilizar un digerido con fines agronómicos es necesario conocer determinados parámetros físico-químicos que permiten decidir la dosis, método y momento óptimo de aplicación en función del cultivo que se busca producir.

Para determinar la calidad de un digerido y decidir la forma de empleo, será necesario, como mínimo, medir el contenido de los elementos que se detallan en el Cuadro 10.

La dosis de digerido, normalmente, se determina en base a los kilogramos de nitrógeno por hectárea (kg de N/ha) que se busca aplicar y, de este modo, sustituir el empleo de fertilizantes inorgánicos. La mayoría de los ensayos realizados

Cuadro 10. Mediciones indispensables para determinar la cantidad y forma de aplicación de un digerido

Detalle	Unidades
Materia seca	en porcentaje g/g o g/l
Sólidos volátiles	en porcentaje g/g o g/l
Carbono orgánico total	COt g/g o g/l
Carbono orgánico disuelto	Cod g/g o g/l
Demanda química de oxígeno total	DQO mg/g o mg/l
Demanda química de oxígeno disuelta	DQOd mg/g o mg/l
Nitrógeno total	Nt g/g o g/l
Fósforo total	Pt g/g o g/l
Potasio total	Kt g/g o g/l

Fuente: Elaborado por los autores.

en diferentes cultivos extensivos, hortícolas y frutícolas demuestra que el digerido permite sustituir fertilizantes minerales de origen sintético (Chantigny *et al.*, 2008; Fuchs *et al.*, 2008; Montemurro *et al.*, 2010; Islam *et al.*, 2010; Bernal Calderón *et al.*, 2014; Casanovas, 2015; Grassi, 2015). Esto es así porque más del 50% del nitrógeno total de los digeridos se encuentra bajo la forma de N-NH_4 y, por lo tanto, es altamente disponible para los cultivos. Cabe remarcar que una incorrecta aplicación puede favorecer la volatilización del NH_4 o, si se aplica una sobredosis, se puede perder nitrógeno por lixiviación por la rápida nitrificación del NH_4 en el suelo.

A la hora de utilizar un digerido como fertilizante es importante tener en cuenta la relación COd/Nt para evitar la inmovilización de nitrógeno por la biota microbiana del suelo. Para esto es necesario utilizar digeridos con materia orgánica estable que hayan sido obtenidos de biorreactores con óptimos parámetros de funcionamiento, que garanticen una alta eficiencia de degradabilidad de los sustratos utilizados. Según algunos autores, un digerido puede ser considerado apto para utilizar directamente en agricultura si el COd es menor que 5,5 g/l y la relación COd/Nt es inferior a 1,5 (Albuquerque *et al.*, 2012). Si estas condiciones no se cumplen, será necesario realizar una maduración posterior del digerido o aplicarlo con suficiente antelación a la fecha de siembra, esto es, al menos 3-4 semanas en verano y 4-6 semanas en invierno (Bernal Calderón *et al.*, 2014).

En cuanto a la conductividad eléctrica (CE) de los digeridos, siempre se encuentra en valores superiores a 4 dS/m (Albuquerque *et al.*, 2012; Della Vecchia, 2010). Esto no impide su utilización agronómica, pero será importante controlar el contenido de sales en el suelo luego de varios años de aplicación. Para evitar problemas en la estructura de los suelos se determina la relación de adsorción de sodio (RAS), que indica la peligrosidad de utilizar agua para fertirrigación. Hay que tener presente que se considera con peligro potencial un agua cuando el valor de RAS es superior a 3 (Richards, 1985). La alta CE provoca toxicidad en semillas y plántulas (Albuquerque *et al.*, 2012), por lo que se

deberá realizar una aplicación previa a la siembra, en un momento avanzado del cultivo y/o entre líneas de siembra para evitar el contacto directo con las semillas.

El contenido de patógenos en el digerido es otro de los parámetros que se deben tener en cuenta a la hora de utilizarlo agronómicamente. Para cumplir con los parámetros establecidos por la Resolución 264/2011 del SENASA para el certificado de compost, no debe detectarse presencia de *Salmonella spp.*; el contenido de coliformes fecales debe ser inferior a 100 nmp/g de peso seco, y los helmintos, menos de un huevo viable en 4 g de peso seco. Es preciso aclarar que la República Argentina, a la fecha, no cuenta con una normativa que establezca los parámetros físico-químicos y la forma de aplicación que deben tener los digeridos para poder ser utilizados en agricultura.

Por último, será importante conocer el contenido de metales pesados, que deberá ser inferior a los límites máximos que establezca la autoridad de aplicación para cada uso.

Al momento de utilizar los digeridos con fines agronómicos, hay ciertos aspectos que es importante considerar:

- la dosis, en función del requerimiento del cultivo y haciendo coincidir el período de mayor disponibilidad de nutrientes con el de mayor requerimiento de las plantas;
- el momento de aplicación, para evitar pérdidas por volatilización y/o lixiviación;
- la composición química y sanitaria, para evitar efectos negativos en los suelos y cursos de agua;
- las zonas de aplicación, evitando áreas sensibles, sitios cercanos a cursos de agua superficiales, suelos con napa freática alta, suelos con limitaciones debidas a salinidad, suelos helados o inundados debido a mal drenaje;
- el momento de aplicación, para favorecer la mayor captación de nutrientes por parte de las plantas;
- la necesidad de complementar la fertilización debido a la falta de algún nutriente.

El modo de aplicación de los digeridos dependerá de si han sido sometidos o no a separación. La fracción sólida (biosol) suele tener un contenido de MS superior al 19%, y la distribución se puede realizar con estercoleras de sólidos, normalmente, antes de la siembra del cultivo. Se puede incorporar al suelo con un equipo cultivador para acelerar la mineralización de la materia orgánica. La fracción líquida (biol) o *el digerido tal cual* (sin separar)

suelen tener un contenido de MS inferior a 8% y su aplicación se puede realizar con estercoleros para líquidos o equipos de riego. Cuando se aplica el biol o digerido tal cual en suelo barbechado es importante incorporarlo inmediatamente, para evitar la volatilización del amonio. A su vez, la aplicación sobre cultivo o pastura (Imagen 16) es factible controlando las dosis para evitar efectos fitotóxicos (Charlón *et al.*, 2004).

Imagen 16. Aplicación de digerido sólido sobre cultivo



4. CONSIDERACIONES BÁSICAS PARA UN ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD Y DISEÑO DE UN BIODIGESTOR



Extrapolar una tecnología exitosa de biodigestión sin considerar los sustratos, temperatura, amplitud térmica, calidad del agua y materiales disponibles, tiene altas chances de llevar a un fracaso.

Son muchos los factores que inciden en la decisión de encarar un proyecto de biodigestión. Si bien el proceso biológico en todos los sistemas es similar, las tecnologías son muy diversas y atienden demandas muy diferentes: no hay una *receta* única. Es por esto que en los siguientes párrafos se intentará hacer un breve recorrido por algunos puntos críticos para tener en cuenta a la hora de diseñar y construir un biodigestor, más allá de la tecnología utilizada y la escala del proyecto.

4.1 Planteo del objetivo

Antes de comenzar cualquier proyecto, debe establecerse para qué se quiere construir un biodigestor. Si bien suele pensarse que el objetivo principal de estos sistemas es la producción de energía renovable en forma de biogás, puede ocurrir que sea un objetivo secundario, un subproducto del proceso fermentativo, como se explicó en el Capítulo N.º 3.

A la hora de pensar un proyecto de biodigestión, se pueden diferenciar objetivos energéticos, ambientales y agronómicos:

- Producción de energía eléctrica.
- Producción de energía térmica.
- Tratamiento de efluentes.
- Producción de biofertilizantes.

La tecnología a utilizar, los materiales, las dimensiones, el lugar, la carga y demás factores estarán influenciados por el objetivo que se persiga, y éste será el que defina el desarrollo de todo el proyecto.

No será igual la tecnología utilizada en un biodigestor para abastecer el consumo de una casa rural con el estiércol de pocos bovinos, que la que se utilizará para tratar cientos de toneladas orgánicas de una ciudad.

Una vez definido este objetivo se puede avanzar con el análisis de campo.

4.2 Análisis de campo

Esta etapa puede dividirse en dos temas importantes:

- Elección de los materiales orgánicos para utilizar como sustrato en la biodigestión.
- Parámetros físico-químicos del proceso.

Elección de los sustratos orgánicos para utilizar en la biodigestión

Prácticamente cualquier sustrato orgánico tiene potencial para degradarse en un biodigestor y generar biogás. El problema aparece con sustratos que son ricos en fibra, con altos contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina, que son enlaces de carbono muy fuertes y que en un medio con pH neutro no logran romperse.

Entre los principales sustratos utilizables se encuentran:

- Excrementos animales.
- Aguas residuales de industrias.
- Subproductos de industrias.
- Restos de cosecha.
- Aguas domiciliarias.

- Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU).
- Biomasa (cultivos energéticos).

En muchos casos, el objetivo inicial por el que se decide construir un biodigestor es tratar un residuo determinado. Es importante analizar bien el contexto en donde se encuentra ese residuo y, también, evaluar previamente si en la zona o establecimiento se genera algún otro residuo orgánico en cantidades significativas. En la medida en que se pueda diversificar la alimentación del biodigestor, más seguro será su funcionamiento. Además, conocer previamente la existencia de otros sustratos potenciales cerca del biodigestor y tenerlos en cuenta para el diseño permite tener mayor flexibilidad con la alimentación del reactor, permitiendo hacer codigestión.

Parámetros físico-químicos del sustrato

En el Capítulo N.º 2 se mostraron los principales parámetros físico-químicos que se deben controlar en la mezcla pues pueden afectar el proceso de biodigestión. De igual manera, será importante analizar la composición de los sustratos mediante los parámetros del Cuadro 11.

Cuadro 11. Parámetros físico-químicos para el análisis de los sustratos que alimentan un biodigestor

Parámetros	Metodología analítica
pH	A.O.A.C. 973,04
Conductividad eléctrica	SM 2510 B
DQO	SM 5210 B - Standard Methods 20TH ED
Nitrógeno Kjeldahl	A.O.A.C. 955,04 Kjeldahl
Carbono orgánico total	Walkley y Black
Relación C/N	-
Materia orgánica total	ASTM D 2974 - 87
Cenizas	ASTM D 2974 - 87
Humedad	APHA 1992
Alcalinidad total	Volumetría

Fuente: Elaborado por los autores.

Si bien estos parámetros no agotan los factores físico-químicos que pueden afectar positiva o negativamente el proceso de biodigestión, permiten tener una primera impresión del sustrato que se pretende digerir y cómo se comportará en un sistema anaeróbico. Se trata de ensayos relativamente sencillos que se pueden realizar en universidades, laboratorios privados, estaciones experimentales nacionales y sitios semejantes.

Conociendo los valores óptimos que deben tener estos parámetros en el interior de un biodigestor y los del sustrato que se utilizará, se puede calcular el potencial de ese material para ser degradado anaeróbicamente y generar biogás, estimar el grado de dilución y agua necesarios, entender si se requerirá o no realizar codigestión, etc. Esto, también, estará relacionado con el diseño del reactor y la forma de alimentación, que permitirán garantizar los parámetros físico-químicos dentro del reactor.

4.3 Diseño propio del biodigestor

Hay tantos diseños de biodigestores como personas y empresas que han construido uno, y esto se debe básicamente a que son contenedores sin oxígeno (anaeróbicos) donde se desarrolla un proceso biológico. La forma, el diseño y los materiales van variando proyecto tras proyecto, perfeccionándose con los años. En el Capítulo N.º 2 puede apreciarse la amplitud de parámetros que pueden variar entre uno y otro.

El diseño del biodigestor, entonces, va a estar condicionado por:

- el nivel tecnológico a utilizar;
- la elección de los materiales para la construcción;
- el diseño propiamente dicho.

Los biodigestores son tecnologías que se han extrapolado de un lugar a otro, lo que en muchos casos generó fracasos, ya que los sustratos no son siempre los mismos, como así tampoco las temperaturas, la amplitud térmica, la calidad del agua, los materiales disponibles, etc. Si bien la base de un proyecto puede ser similar a la de otro, para garantizar que sea exitoso se deben tener en

cuenta todas las variables que se presentan en este trabajo.

La adaptación de tecnologías que a veces se realiza con el objetivo de reducir costos iniciales lleva a que los biodigestores no funcionen eficientemente o incluso dejen de funcionar por grandes períodos de tiempo, que se incurran en grandes gastos para intentar ponerlos en marcha o mejorar su funcionamiento, o, en los peores casos, que se generen problemas o fallas que no tengan solución.

Hasta el más simple y sencillo biodigestor involucra conocimientos de biología, de microbiología, de química y física, de materiales de construcción, de dinámica de fluidos, de gases, de normas de seguridad, de ingeniería y otros. Cuanto más detalles incluya el diseño de un proyecto, tanto más seguro será su éxito.

A continuación, se muestran los componentes que necesita un biodigestor o una central de biogás para tener un funcionamiento correcto, desde los sistemas domésticos hasta los industriales de alta tecnología.

Tanque o contenedor (biodigestor)

Lo que se denomina biodigestor, o reactor, es básicamente un contenedor donde se produce el proceso biológico en ausencia de oxígeno, puede estar construido con distintos materiales y formas:

- acero al carbono protegido;
- acero inoxidable;
- tanques de hormigón;
- tanques de PRFV;
- tanques plásticos;
- geomembranas;
- otros.

Como se explicó, lo que se busca principalmente es que los materiales usados sean resistentes a los ácidos orgánicos que se generan en el proceso, al ataque químico que produce el ácido sulfhídrico contenido en el biogás, que eviten pérdidas de líquidos, que sean impermeables al biogás y que resistan el ataque de los rayos UV. La elección de

uno u otro material dependerá de cada proyecto, del objetivo que se persiga, de la durabilidad y vida útil buscada, de los montos de inversión, etc. En la medida en que el biodigestor sea de mayores dimensiones, la elección de los materiales debería ser más rigurosa y delicada e involucrar profesionales de la ingeniería civil y química, ya que una pérdida o rotura en un biodigestor de, por ejemplo, 5 000 m³, podría ser catastrófica en costos económicos, operativos, ambientales y sociales.

A escala industrial, normalmente, los digestores se construyen de hormigón armado y/o acero al carbono vidriado. En estos casos es común que la parte superior del muro y el techo del reactor se protejan con pintura epoxi (en el caso del hormigón armado, como se ve en la Imagen 17) y/o acero inoxidable (en el caso del acero al carbono).

Una vez diseñado y construido el biodigestor, deberían realizarse pruebas hidráulicas antes de su

puesta en marcha, para comprobar que no existan pérdidas o fisuras. Parte del agua utilizada puede quedar en el biodigestor para recibir la carga inicial con material orgánico, permitiendo y facilitando la solubilidad y el mezclado de esta materia.

Calefacción del biodigestor

La calefacción del biodigestor se puede lograr mediante el uso de diferentes tecnologías, cada una con sus ventajas y desventajas. Muchas veces el uso de una u otra forma de calentar depende del profesional que lleve adelante el proyecto, que determinará el criterio de selección por conocimiento, materiales disponibles, costo económico, entre otros factores.

Como se explica en el Capítulo N.º 3, el calor generado en grupos electrógenos puede ser reaprovechado para calentar el biodigestor, produciendo una masa de agua o líquido caliente que transmite su calor al sistema. Este calor también puede

Imagen 17. Interior de un digestor de hormigón con protección epoxi en la parte superior



© IFES

generarse en una caldera utilizando el mismo biogás para su combustión.

Los sistemas que controlan la temperatura del biodigestor pueden dividirse principalmente en externos e internos.

Externos son aquellos sistemas que permiten generar un intercambio de calor en un equipo fuera del biodigestor, con lo cual su uso, mantenimiento y reparaciones son independientes del sistema. Por un lado, hay sistemas similares a lozas radiantes con cañerías en las que circulan líquidos térmicos que se acoplan por fuera de las paredes externas del biodigestor para calentarlo. Sobre estos sistemas se adicionan aislantes para evitar pérdidas de calor y, finalmente, chapas o cobertores para proteger el sistema. Esta técnica es eficiente cuando el reactor es construido en acero.

Otra alternativa usada comúnmente son los intercambiadores de calor tubo en tubo (Imagen

18), por cuya cañería interna circula la mezcla contenida en el biodigestor, y por la tubería externa, que lo envuelve a contracorriente, circula agua a 80-90 °C.

La ventaja de estos sistemas externos es que, al ser independientes, si sufren una rotura y necesitan mantenimiento o refacciones, estas no interfieren con la actividad normal del biodigestor.

Los sistemas internos de calefacción incorporan cañerías en la misma estructura del biodigestor, ya sea en sus paredes o en la platea, o incluso adosadas a su cara interna en contacto directo con el líquido. Estos sistemas pueden generar un intercambio de calor más rápido en algunos casos; sin embargo, ante cualquier desperfecto, mantenimiento o reparación, es necesario ingresar al biodigestor y frenar su actividad, lo que implica tener que hacer una nueva puesta en marcha, con lo que eso supone en costos operativos y de tiempo.

Imagen 18. Sistema de intercambiador tubo en tubo



© IFES

Calefacción de biodigestores domiciliarios

Los biodigestores rurales de pequeña escala generalmente no tienen un sistema que entregue calor, sobre todo porque son tecnologías que se diseñaron para zonas tropicales, donde la temperatura no es un problema. Sin embargo, en zonas templadas a frías, así como en la altura, sí se busca de diversas maneras aislar el biodigestor del ambiente, para lograr mantener la temperatura interna por encima del mínimo necesario para que ocurra el proceso.

En los últimos años se encontró que es primordial favorecer la aislación alrededor de la parte líquida, donde más pérdida de calor se genera; en la superficie, la misma cámara de biogás dentro del biodigestor crea una aislación.

La Argentina tiene climas muy diversos y zonas frías gran parte del año. En estos sitios es fundamental lograr una buena aislación, y pensar en sistemas de calefacción que al menos garanticen mantener la mezcla en un rango no menor a 12-15 °C dentro del biodigestor. En la actualidad, los sistemas de calefacción solar permiten lograr estos objetivos en biodigestores domiciliarios, con

buenos rendimientos. Existen también alternativas utilizando rocas que toman calor del sol, invernáculos y otras. Las posibilidades son muchas.

Sistemas de carga

Más allá de su escala y nivel de tecnología, los biodigestores suelen tener una cámara de precarga, también llamada cámara de premezcla o de alimentación, en donde se mezclan los sustratos para preparar el material que ingresará.

Los sistemas de carga se pueden diferenciar en dos grandes grupos:

- manuales sin tecnología;
- mecánicos con tecnología (Imagen 20).

Los biodigestores domiciliarios, ya sean flexibles o rígidos, son cargados manualmente por el usuario (Imagen 19). Pueden tener o no cámara de precarga y, en algunos casos, se alimentan directamente desde una tubería de entrada. Con la ayuda de baldes, palas, palos, tanques de precarga, se realiza una homogeneización de la mezcla que va a alimentar al biodigestor, que ingresa por diferencia de altura.

Imagen 19. Carga de un biodigestor

Imagen 20. Cámara de carga de biodigestor en tambor estabulado



Imagen 21. Sistema de trituración en cámara de premezcla



Imagen 22. Carga de biomasa sólida en tanque de premezcla con pala frontal



Imagen 23. Sistema de precarga de biodigestores con diferentes sustratos sólidos y líquidos

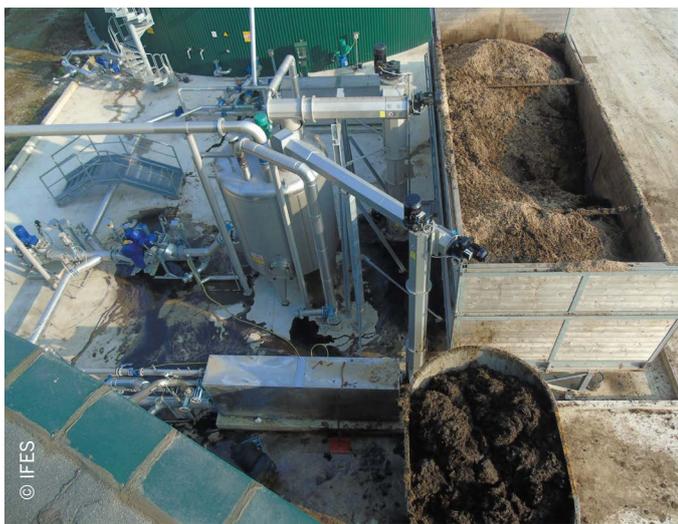


Imagen 24. Sistema de limpieza de FORSU, pretratamiento para envío del sustrato a tanque de precarga



La cantidad de litros que ingresa es prácticamente la misma que sale del biodigestor por diferencia de nivel, generalmente hacia un tanque de recepción. Desde ese tanque el usuario puede tomar el digerido y usarlo como biofertilizante. En muchos casos es útil que la cámara o tanque de salida tenga un volumen varias veces mayor a la cantidad de litros que se cargan y salen diariamente, de manera de no necesitar retirar todos los días biofertilizante. Adicionalmente, se puede proveer una laguna o recipiente de almacenamiento del digerido para utilizarlo en determinadas épocas del año.

En contraposición, hay sistemas mecánicos con una gran cantidad de opciones, que principalmente varían según el tipo de sustrato que se maneje y de la cantidad de sólidos y de agua que tenga. Además, dependiendo del tipo de sustrato existen sistemas de pretratamiento para eliminación de materiales pesados (piedras, arenas) y/o plásticos.

Para cargas de efluentes líquidos se utilizan tanques de recepción con bombas que pueden tener trituradores para minimizar el tamaño de las partículas orgánicas y mejorar la superficie de contacto dentro del biodigestor, garantizando una digestibilidad más alta.

Las cámaras de carga pueden tener sistemas de homogenización con agitadores, o las mismas bombas que luego serán las que introducirán la carga al biodigestor se utilizan para mezclar el sustrato con recirculación.

En caso de contar con sustratos sólidos, se pueden adicionar a la mezcla en la cámara de precarga utilizando una pala mecánica (Imagen 22) o alguna cinta transportadora, o introducirse directamente al biodigestor con tornillos sin fin.

El uso de uno u otro sistema de carga depende de los costos, de la disponibilidad de tecnología, de la cantidad de horas que se quieran destinar a cargar, del tipo de sustrato, etc. En el caso de tener sólidos de gran tamaño, se pueden incorporar sistemas de trituración para que no provoquen daños u obturaciones en las bombas y cañerías de líquidos (Imagen 21).

Sistemas de agitación

Se ha dicho que un biodigestor húmedo puede contener sustratos con porcentajes de sólidos de

hasta un 15-17% masa en masa (m/m). En la práctica, los valores máximos que se utilizan para estas tecnologías son cercanos a 12-14%, con lo que es de esperarse que, si no se mezcla, parte del material precipite y parte quede flotando. Además de los problemas en los equipos que esto puede ocasionar, el material orgánico no queda en contacto con los microorganismos, lo que genera ineficiencia en el proceso.

Si bien tales problemas se incrementan cuanto mayor es el contenido de sólidos, incluso los que tienen baja cantidad, como los biodigestores tipo laguna sin agitación, con el tiempo empiezan a mostrar dificultades, costras superficiales, lodos en las profundidades, entre otros.

Los sistemas de agitación pueden ser externos o internos, y horizontales (Imagen 25) o verticales (Imagen 26). El diseño del reactor y el tipo de sustrato son los que determinarán el sistema óptimo de agitación. Con estos equipos se deberá garantizar que no sedimenten sólidos, que no se forme una costra superficial ni se genere espuma.

Si se carga un biodigestor con los efluentes de un tambo (que básicamente se componen de estiércol bovino, residuos de alimentos, materiales inertes como arenas y otros que pueden arrastrarse) y esa mezcla ingresa a un recipiente junto con agua y se deja en reposo, seguramente parte del material precipitará al fondo del tanque y parte comenzará a flotar.

Ese problema es muy común en los sistemas agropecuarios que tienen grandes lagunas para tratar sus efluentes sin agitación, en muchos de los cuales hasta se pueden ver islas, incluso tapando toda la laguna, ya que el material que flota comienza a acumularse, se une, se solidifica, y crea una cubierta dura y rígida. Además, los sólidos que se acumulan en el fondo, con el tiempo, generan una capa de lodos que queda fuera del sistema. En estos casos, los microorganismos no tienen fácil acceso a la materia orgánica, esta puede generar problemas hidráulicos y el sistema entero dejar de funcionar.

Lo mismo que ocurre en las lagunas puede darse en los biodigestores si están mal diseñados y/o no cuentan con la tecnología necesaria que garantice una correcta homogeneización.



Imagen 25. Vista externa de agitador horizontal en muro de biodigestor

Imagen 26. Vista interna de agitadores verticales de acero inoxidable



Los métodos y sistemas para garantizar movimientos dentro del biodigestor van desde los más sencillos, que principalmente aprovechan características propias del diseño sin necesidad de utilizar energía extra o sistemas mecánicos, hasta grandes bombas de recirculación y sistemas de agitación continuos que logran una mezcla completa.

No hay un sistema superior a otro, más bien hay mejores adaptaciones a situaciones particulares. En un biodigestor familiar en un campo no conectado a la red energética es difícil pensar en un sistema de agitación continuo con bombas o paletas mecánicas; en un biodigestor que trate el residuo orgánico de una gran urbe se necesitarán tecnologías más avanzadas para cientos de toneladas diarias de materia orgánica.

Sistemas de bombeo

A la hora de elegir los equipos que moverán los sólidos y los líquidos, es importante tener en cuenta garantías de funcionamiento para esos sustratos, que aseguren los caudales y presiones de trabajo deseados. Las bombas permiten realizar las mezclas previas al biodigestor, ingresar el sustrato diario desde las cámaras de precarga, recircular el líqui-

do interno para calentarlo con intercambiadores de calor o servir como sistemas de mezclado por recirculación. Uno de los problemas más importantes a pequeña y mediana escala es la utilización de bombas de fluidos que no están diseñadas para biodigestores, y menos si tienen una mezcla muy sólida. No sólo es importante la cantidad de sólidos, sino también el tipo y forma. Las fibras vegetales, que muchas veces aparecen en residuos agropecuarios, pueden generar fácilmente taponamientos y obstrucciones en los sistemas de carga y recirculación, sobre todo en los ejes de las bombas centrífugas. La mala elección en el sistema de bombeo puede llevar al fracaso completo de un proyecto.

Las bombas que se emplean en las plantas de biogás para mover los sustratos pueden ser de tipo centrífugas. Estos equipos consisten en un rotor que gira rápidamente en una vena fluida. Permiten entregar altos caudales y son de construcción robusta. Pueden tener motor sumergido e incorporar un triturador para disminuir el tamaño particular. Normalmente, este tipo de bombas son adecuadas para trabajar con efluentes con contenido de materia seca por debajo de 8% m/m y con tamaño de partículas inferior a 5 cm.

Imagen 27. Bomba lobular



Imagen 28. Bomba de tornillo



El otro tipo de bombas empleadas en biodigestores son las de desplazamiento positivo o alternativo. Estos equipos operan con el principio de entregar un desplazamiento positivo a la vena fluida, en uno o varios cuerpos de la bomba. Permiten mover sustratos con altos contenidos de sólidos y mezclar materias primas sólidas con líquidos. En esta categoría pueden distinguirse las bombas de pistón, las lobulares (Imagen 27) y las de tornillo (Imagen 28).

4.4 Dimensionamiento del biodigestor

Para dimensionar un proyecto hay tres factores importantes a tener en cuenta:

- la carga diaria que tendrá el biodigestor;
- la temperatura de trabajo;
- el tiempo de retención hidráulica.

Dependiendo de la elección de la tecnología, del ambiente en donde se ubicará el biodigestor, de la temperatura de ingreso de la carga, de los materiales y otros factores, se puede estimar la temperatura de trabajo a la que se desarrollará el proceso de biodigestión.

Para tener una aproximación a la dimensión real de un proyecto se necesita saber el tiempo de retención hidráulica (TRH) y el volumen de carga diaria, como se detalla en el Capítulo N.º 2. Cabe recordar que el volumen teórico del biodigestor es:

$$\text{Cantidad de carga/día (m}^3\text{/d)} \times \text{TRH (días)} = \text{Volumen biodigestor (m}^3\text{)}$$

La temperatura de trabajo será importante entonces para definir y dimensionar un biodigestor, ya que según se proyecte puede implicar variaciones enormes en el tamaño del biodigestor, como se observa en el siguiente ejemplo:

$$\text{Biodigestor mesofílico: } 30 \text{ m}^3\text{/día} \times 35 \text{ días} = 1050 \text{ m}^3$$

$$\text{Biodigestor psicrófilico: } 30 \text{ m}^3\text{/día} \times 60 \text{ días} = 1800 \text{ m}^3$$

Es por esto que en biodigestores que no tengan control de temperatura, el dimensionamiento debe calcularse en función de la peor condición térmica

del año, ya que si se toma la temperatura media anual se puede caer en el error de subdimensionar el tamaño, y en invierno no se estará cumpliendo el tiempo de retención hidráulica que debería tener, con la consecuente disminución de la producción de biogás. Puede darse el caso de que la inversión y los costos de aislar el biodigestor y colocarle un sistema de calefacción terminen siendo una mejor opción que construir uno más grande.

Las herramientas mencionadas son las que permitirán desarrollar un proyecto en que los costos, la inversión, los beneficios, el tamaño y las eficiencias buscados se conjuguen para determinar su propia opción óptima.

4.5 Ubicación del biodigestor

Para la ubicación del biodigestor hay que analizar dos puntos críticos:

- la facilidad de la carga;
- la cercanía al lugar de utilización del biogás.

Hay que tener en cuenta que es mucho más fácil mover y transportar biogás –a través de cañerías con un diferencial de presión incluso bajo– que la carga del biodigestor. Existe un rango óptimo de distancia que varía de acuerdo con el tipo de sustrato, el proyecto y los objetivos; si se supera, no es rentable llevar ese sustrato al biodigestor, ya que los costos energéticos y económicos de su movilización exceden los ingresos que genera.

Lo mismo ocurre en los sistemas rurales domiciliarios, en que la distancia máxima la estipula la capacidad que tenga una familia de mover la cantidad de residuos necesarios hasta el biodigestor.

Dependiendo de la escala del proyecto y la dimensión del biodigestor, otros elementos para tener en cuenta son un estudio de la profundidad de la napa freática y un estudio de suelos para obras civiles.

En muchos proyectos, por abaratar costos en la etapa de planificación, no se contemplan esos factores, que finalmente terminan incidiendo negativamente en la obra, ya sea por tener que incrementar la inversión inicial del proyecto cuando no estaba contemplado, como, peor aún, porque se

Las normas de seguridad relativas al biogás y al digerido no solo afianzan el éxito de un proyecto en términos económicos y de eficiencia, sino que también protegen el ambiente y la vida de los trabajadores de la planta.

daña la integridad física del biodigestor con desperfectos casi irreparables.

4.6 Factores de seguridad

Más allá de los beneficios que genera una planta de biogás o biodigestor, hay ciertos aspectos relacionados con la seguridad, inherentes a la escala de proyecto, que no deben escapar. A mayor escala, mayores son los riesgos potenciales y mayor debería ser la atención que se presta a las normas de seguridad.

Por un lado, es preciso comprender que en muchos casos se manipulan residuos y efluentes tanto líquidos como sólidos que pueden contener sustancias contaminantes y tóxicas, y/o patógenos. Se trabaja con un biogás que es inflamable, tóxico y puede contener, dependiendo de los sustratos utilizados, sustancias altamente corrosivas. Su manejo incorrecto puede ocasionar riesgos de incendios y quemaduras, y su aspiración directa puede provocar la muerte.

Por otro lado, sobre todo en plantas con mayores niveles de tecnología y equipamientos, también existen superficies calientes, riesgos eléctricos, posibilidad de accidentes y caídas, superficies resbaladizas y sustancias peligrosas.

Las normas de seguridad no solo consolidan el éxito de un proyecto a nivel de eficiencia y economía, sino que también protegen la vida de las personas que trabajan en la planta de biogás, el ambiente y la flora y fauna de la región. No tenerlas

en cuenta en la construcción de las plantas o en la elección de los materiales puede provocar también pérdidas de efluentes, con impactos negativos importantes sobre el ambiente, principalmente sobre el suelo y las aguas. La liberación de metano a la atmósfera, además de los riesgos de incendio y explosiones, tiene incidencia en el efecto invernadero.

Por otro lado, es importante realizar un manejo racional del digerido. Este subproducto, al ser utilizado como biofertilizante, puede liberar tóxicos sobre el suelo que luego terminan en cultivos de consumo animal y humano, puede contaminar suelos y napas freáticas. Por ello, es importante el trabajo de profesionales del agro que puedan analizar caso por caso cada digerido, realizar ensayos en cultivos extensivos e intensivos, y generar bases de recomendación de aplicación.

Actualmente, en la Argentina no existen normas de seguridad que se apliquen a la instalación de plantas de biogás o biodigestores, lo que lleva a que la seguridad de dichos proyectos sea enteramente responsabilidad de los constructores, que pueden tomar como referencia normativas y legislaciones de otros países que sí las tienen. Una de estas referencias es la del Instituto Alemán de Normalización (DIN), uno de los organismos mundiales con mayor legislación acerca del biogás y las plantas de biogás².

4.7 Mantenimiento y controles diarios

El mantenimiento de un biodigestor y los controles que requiera estarán estrechamente relacionados con su tipo, con el equipamiento que tenga, con la calidad de los materiales que se hayan usado para su construcción, así como también con el tipo y cantidad de material orgánico que reciba diariamente.

Como medida base, dentro de los controles periódicos hay que verificar que no existan roturas ni fisuras en el biodigestor que conduzcan a pérdidas de líquidos o gases. Si el biodigestor está bien diseñado y construido con materiales admisibles para el manejo de este tipo de sustratos y gases, su vida útil podría alcanzar 20 años, incluso más.

² (<https://www.din.de/en>).

La mala elección de materiales implica paradas anuales para vaciar el biodigestor a fin de repararlo y mantenerlo, lo que en proyectos de mediana a gran escala comienza a ser inviable económica y técnicamente.

En cuanto a los controles básicos que permiten tener un seguimiento del biodigestor, la temperatura, el pH, la cantidad de carga y su periodicidad, sumados a la medición de la producción de biogás, permiten entender rápidamente cómo funciona el sistema y la eficiencia que tiene, así como también prevenir problemas que pudieran estar relacionados con fallas en los equipos o cambios en la alimentación.

La revisión de los sistemas de seguridad y venteo también debería realizarse periódicamente para evitar riesgos por sobrepresión. Generalmente, funcionan con válvulas de seguridad con agua, por lo que también hay que revisar que tengan el agua suficiente, de modo que el biogás no escape por ellas. En plantas industriales, generalmente se dispone de sistemas con sensores que regulan la entrada de agua en caso de evaporación o pérdida. En sistemas caseros, es más común que aparezcan pérdidas de biogás por evaporación de agua en la válvula de seguridad.

Otro tema para tener en cuenta, sobre todo en sistemas caseros donde se utilizan materiales de bajo costo, con poca firmeza y rigidez, es la posibilidad de encontrar agua condensada en las cañerías de conducción de biogás. Dependiendo de su cantidad, esto puede ser un impedimento físico para el paso de biogás, lo que incrementa la presión en el sistema.

En cuanto a las partes o sistemas que tengan membranas (biodigestor, gasómetro, reservorios de gas, reservorios de líquidos), es importante revisar que no existan elementos cortantes, árboles u otros cuerpos que pongan en riesgo su integridad.

También se debería, si es posible, contar con equipos y sensores que midan la cantidad de sulfuro de hidrógeno, o enviar muestras al laboratorio para tener un seguimiento del funcionamiento de los filtros y saber cuándo hay que cambiarlos en caso de que sean de vida útil limitada.

Cada equipo específico (bombas, motores, agitadores, calentadores, *chillers* o enfriadores, sopladores, grupos electrógenos, etc.) tiene mantenimientos y servicios propios; los proveedores de esas tecnologías informan cada cuánto hay que hacerlos y los costos que conllevan. No llevarlos a cabo no sólo supone problemas de eficiencia y funcionamiento, sino que puede incluso poner en riesgo la vida útil de todo el biodigestor, de la salud de los operarios y del ambiente.

5. CÁLCULOS DE RENDIMIENTO



Para estimar la cantidad de biogás que puede generar un proyecto, se debería como mínimo intentar identificar el contenido de sólidos volátiles del residuo que se utilizaría como sustrato.

Cuánto biogás se puede producir, qué tamaño de biodigestor se necesita para tratar una determinada cantidad de residuos y cuánta energía se va a generar son algunas de las preguntas más frecuentes y que muchas veces más dificultan poder entender la dimensión de un proyecto de biodigestión.

Sin embargo, es factible escalar los proyectos basados en cálculos teóricos con aproximaciones bastante cercanas a la realidad.

Este capítulo se enfoca en las distintas maneras de estimar la producción de biogás y de energía que se pueden generar con un biodigestor y las cantidades de digerido disponibles como biofertilizantes, a partir de cálculos teóricos que permitirán estimar:

- cuál será la producción de biogás en el tiempo;
- qué cantidad de energía térmica y/o eléctrica se puede producir con ese biogás;
- qué cantidad de digerido (biofertilizantes cuan-

do las características lo permitan) generará el proyecto.

Finalmente, para poder comprender mejor los conceptos, se analizarán dos ejemplos teóricos aplicando los cálculos detallados en este capítulo.

5.1 Estimación de la producción de biogás

Existen numerosas tablas y datos que expresan la cantidad de biogás que se puede obtener a partir de diferentes sustratos. Esta información generalmente se logra a partir de ensayos de biogasificación en *batch*, o de biodigestores continuos tanto de investigación como reales en funcionamiento.

Normalmente, la cantidad de biogás aparece relacionada con la de sólidos volátiles de los sustratos, y esto permite reducir cualquier alteración en los datos que provenga propiamente de la humedad de la muestra que se analiza y/o de los inertes inorgánicos que pueda tener.

Los datos de terceros, si bien son válidos para realizar estimaciones, hay que tomarlos con cuidado, especialmente si se están proyectando biodigestores de grandes escalas, ya que la calidad de la materia prima puede variar enormemente, incluso siendo de la misma tipología. Por ejemplo, puede decirse que el estiércol de vaca no será el mismo en un tambo estabulado de Alemania con alimento balanceado, que en un tambo de la provincia de Buenos Aires, donde el alimento es pasto natural o pastura; de igual manera, el residuo sólido urba-

no de una ciudad de Europa, puede diferir mucho del de una ciudad de América del Sur. Es por esto que los datos de terceros hay que tomarlos como estimativos. Si se quiere avanzar con un proyecto serio, lo recomendable es hacer una prueba piloto con el sustrato real que alimentará al biodigestor, lo que permitirá tener datos concretos.

Existen numerosas tablas, hechas con diferentes metodologías y criterios. Algunas veces se referencia la cantidad de biogás producido por kilogramo de sólidos volátiles (SV), como muestra

Cuadro 12. Litros de metano producidos en función de los kilogramos de sólidos volátiles

Sustratos	Metano l/kg SV	Referencia
Residuos sólidos municipales	360	Vogt <i>et al.</i> , 2002.
Residuos de frutas y de mataderos	850	Forster-Carneiro <i>et al.</i> , 2007.
Purines de cerdos	337	Ahn <i>et al.</i> , 2010.
Paja de arroz	350	Lei <i>et al.</i> , 2010.
Ensilado de maíz	312	Mumme <i>et al.</i> , 2010.
Residuos orgánicos ricos en lignina	200	Jayasinghe <i>et al.</i> , 2011.
Estiércol de cerdo y aguas residuales	348	Riaño <i>et al.</i> , 2011.
Restos de comida	396	Zhang <i>et al.</i> , 2011.

Fuente: Elaborado por los autores.

Cuadro 13. Metros cúbicos de biogás producidos en función de diferentes tipos de estiércol

Estiércol	kg húmedo/día	Relación C/N	m ³ biogás/kg húmedo
Bovino (500 kg)	10,00	25	0,04
Porcino (50 kg)	2,25	13	0,06
Aves (2 kg)	0,18	19	0,08
Ovino (32 kg)	1,50	35	0,05
Caprino (50 kg)	2,00	40	0,05
Equino (450 kg)	10,00	50	0,04
Conejo (3 kg)	0,35	13	0,06
Excretas humanas	0,40	3	0,06

Fuente: Varnero y Arellano (1990).

el Cuadro 12. Otras, se expresa en función del material húmedo (Cuadro 13). En otros casos, se manifiesta sobre el porcentaje de materia seca (MS) (Cuadro 14).

Hay que tener en cuenta que cuando se busca información y se toman los resultados de este tipo de tablas para estimar la cantidad de biogás que puede producir un proyecto, los datos pueden distar enormemente de la realidad.

En principio y partiendo de que son análisis sencillos y de bajo costo, se debería intentar identificar como mínimo el contenido de SV del residuo o material orgánico que se quiere utilizar en el biodigestor, ya que si se toman solamente los valores de MS (Cuadro 14) o de tablas que toman como unidad la materia fresca o húmeda (Cuadro 13), se pueden cometer muchos errores.

Un establecimiento porcino con un sistema de limpieza basado en pisos ranurados y canales con pendientes hacia fosas, dispondrá de un efluente

más concentrado que uno con piso de hormigón donde una persona limpia con manguera los corrales, aunque tengan el mismo tamaño, la misma cantidad de animales y obtengan la misma cantidad de estiércol por animal. En un caso así, si se toma como referencia los kilogramos húmedos del residuo animal, seguramente se estará sobredimensionando la cantidad de biogás que se podría obtener.

La cuenta para realizar esta estimación es la siguiente:

$$\text{Producción diaria de biogás (m}^3 \text{ biogás/día)} \\ = \text{Cantidad de efluentes diarios (m}^3 \text{ efluente/día)} \times \text{Equivalente producción de biogás para ese efluente (m}^3 \text{ biogás/m}^3 \text{ efluente)}$$

En el caso de las tablas con referencia a MS, el problema es que algunos residuos, como el estiércol de *feedlots* con piso de tierra o camas de pollo, pueden generar muestras contaminadas con tierra,

Cuadro 14. Litros de biogás y de metano producidos en función de los kilogramos de materia seca

Sustratos	Litros de biogás/ kilogramos de MS	Litros de metano/ kilogramos de MS
Lodos aguas residuales urbanas	0,43	0,34
Basuras urbanas	0,61	0,38
Desechos de papel	0,23	0,14
Contenido intestinal matadero	0,47	0,35
Contenido vísceras matadero	0,09	0,04
Sangre matadero	0,16	0,08
Lodos industria láctea	0,98	0,74
Residuos cerveceros	0,43	0,33
Estiércol vacuno	0,40	0,90
Estiércol porcino	0,26	0,21
Hojas de papa	0,53	0,40
Hojas de maíz	0,49	0,41
Hojas de remolacha	0,46	0,39

Fuente: Ortega Rodríguez (2001).

limos, arcillas, piedras, cáscara de arroz o aserrín, materiales que no aportan a la biodigestión y no producen biogás, por lo que también podrían estar sobredimensionando la cantidad diaria de biogás obtenible:

Producción diaria de biogás (m^3 biogás/día) = Cantidad de estiércol diario (kg de MS estiércol/día) x Equivalente producción de biogás para ese efluente (m^3 biogás/kg de MS estiércol)

Es por esto que lo mejor es intentar al menos saber la cantidad de SV que se tienen por día en los residuos o efluentes en estudio. De esta manera, las diferencias que puede haber para una misma materia prima por tener más agua o más material inorgánico quedan desestimadas y el valor puede asemejarse más a la realidad:

Producción diaria de biogás (m^3 biogás/día) = Cantidad de estiércol diario (kg de SV efluente/día) x Equivalente producción de biogás para ese efluente (m^3 biogás/kg de SV efluente)

En relación con la cantidad de energía eléctrica que puede producirse en un grupo electrógeno, los rendimientos los dan las empresas que generan y construyen estos equipos y, por lo general, se encuentran todos en un rango bastante similar. Claramente, además de las características propias de cada equipo, el porcentaje de metano que tenga el biogás puede variar mucho la cantidad de energía por metro cúbico que este biocombustible es capaz de generar.

Por lo general, en grupos de baja potencia, el rendimiento puede ser un poco menor, cercano al 35%, y se entiende que se puede producir 1,72 kWh por metro cúbico de biogás. Para grupos de potencias mayores, superiores a 500 kVa, la eficiencia puede llegar al 42% con una conversión capaz de alcanzar incluso valores de 2,2 kWh por metro cúbico de biogás.

Equivalente producción de energía eléctrica (kWh/m^3 biogás) = 1,72-2,2 kWh/m^3

Producción diaria de energía eléctrica ($kWh/día$) = Cantidad de biogás diaria ($m^3/día$) x Equivalente producción de energía eléctrica (kWh/m^3 biogás)

En el Capítulo N.º 3 se mostró que un grupo electrógeno utiliza aproximadamente un 40% de la energía contenida en el biogás para generar energía eléctrica, mientras que el resto se pierde en forma de calor. En los casos en que se realiza cogeneración, si bien el aprovechamiento del calor no llega al 100%, se estima que por cada kWh eléctrico producido puede obtenerse 1 kWh térmico.

Equivalente producción de energía térmica de un grupo (kWh térmico/ kWh eléctrico) = 1 (kWh térmico/ kWh eléctrico)

5.2 Estimación de la producción de biofertilizantes

El cálculo de cuánto biofertilizante puede producir un biodigestor y su composición físico-química está íntimamente ligado al sustrato que se utilice como carga y a la eficiencia del biodigestor. Desde el punto de vista del volumen, sale aproximadamente un 90-95% de lo que ingresó en un biodigestor; sin embargo, la composición química del digerido puede variar significativamente. Si el proceso de biodigestión se está desarrollando de modo eficiente, es esperable encontrar una gran reducción en el porcentaje de sólidos, que puede ser incluso 50% inferior a la de entrada.

Cabe destacar que, si bien el proceso de biodigestión mejora muchas propiedades de la materia orgánica para su utilización como biofertilizante, no todos los efluentes de un biodigestor pueden usarse con tal fin. Si el agua o los sustratos con los que se realiza la mezcla contienen tóxicos o metales pesados y/o microorganismos perjudiciales para el ambiente y la salud humana y animal, el uso de los biofertilizantes no se recomienda.

Efluentes del biodigestor ($m^3/día$) = Porcentaje de eficiencia (90-95%) x efluentes del biodigestor ($m^3/día$)

5.3 Ejemplo teórico

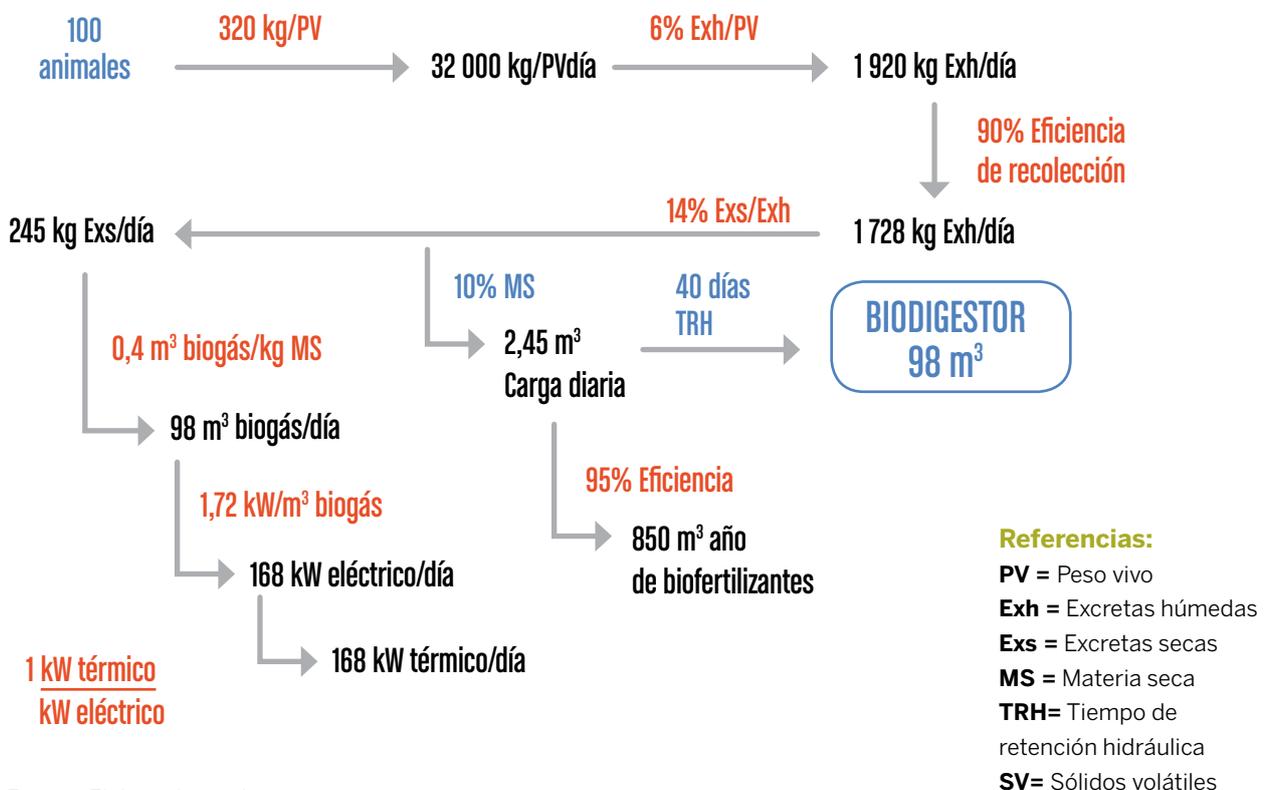
A continuación, se muestra con un ejemplo teórico cómo dimensionar un proyecto partiendo solamente de la cantidad de animales (100) de un establecimiento ganadero tipo *feedlot*. En el Gráfico 9, se destacan en color naranja los valores tomados de tablas y estadísticas que ayudan a dimensionar el proyecto. Para el cálculo de la producción de biogás, se tomaron los valores del Cuadro 14. En azul se muestran valores arbitrarios de selección, asumiendo que el proyecto se diseña con un biodigestor con sistema de agitación a una temperatura de trabajo cercana a los 30 °C. Con estos parámetros, se asume que el biodigestor puede tener una mezcla al 10% de materia seca y se le asigna al proceso, como tiempo de retención hidráulica (TRH), 40 días teóricos.

Si, por ejemplo, se asume que el proyecto no va a tener control de temperatura, para mantener una misma producción de biogás se debería aumentar el TRH conforme al descenso de temperatura, lo que va a cambiar el tamaño del biodigestor.

En la medida en que los valores teóricos en naranja se reemplacen por valores medidos a campo (peso de los animales, cantidad de excretas húmedas por día potencialmente recolectables, cantidad de materia seca de esa excreta húmeda, ensayos de biogás para determinar la cantidad real para este caso, etc.), más cercanos estarán los cálculos teóricos de los reales.

Cabe destacar que, en ambos ejemplos, cuando se dimensiona el volumen del biodigestor se refiere al de la parte líquida. En función del diseño del biodigestor y el uso que se le dará al biogás, a ese volumen hay que agregarle un plus para la cámara

Gráfico 9. Primer ejemplo de dimensionamiento



Fuente: Elaborado por los autores.

de biogás. Esta puede ser entre 10 y 50% del volumen del líquido, aunque lo recomendable es que no supere el 20-30%. En caso de necesitar o querer mayor almacenamiento de biogás, se puede agregar un gasómetro o gasómetro externo. En muchos biodigestores, sobre todo en los que son tipo laguna cerrada, se instalaron gasómetros de membranas muy grandes, de varios metros de altura. El problema de este tipo de gasómetros es que cuando la producción de biogás disminuye, o aumenta el consumo, la membrana pierde tensión y resistencia frente a adversidades climáticas, y queda expuesta a roturas por vientos y lluvias fuertes.

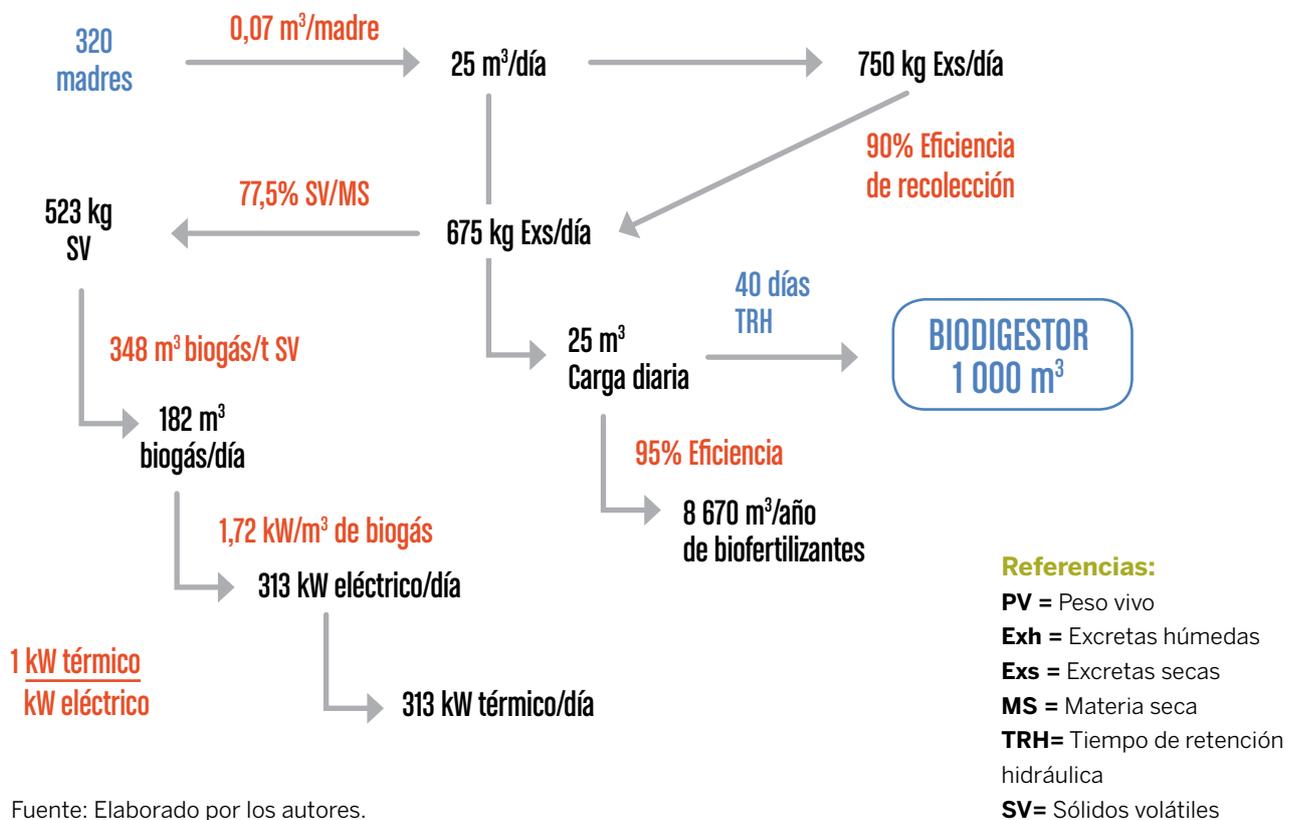
Estos ejercicios permiten jugar con distintas variables, principalmente con el porcentaje de MS que se quiere introducir en el biodigestor, la temperatura y con esto el TRH, para dimensionar diferentes proyectos.

Así como en el primer ejemplo se tomó la cantidad de animales que se podrían tener en un establecimiento y a partir de esos datos se dimensionó el proyecto, se podría ingresar en el ejercicio la potencia que se quiere producir y estimar la cantidad de residuos que se necesitarían para ello.

Un problema clave, específicamente respecto de los *feedlot* o sistemas de engorde intensivo para ganado vacuno, es que en la Argentina los corrales se realizan por lo general sobre la tierra, en algunos casos sin siquiera compactarla. Este problema genera que los residuos de los animales no puedan recolectarse de forma eficiente, lo que puede llevar a rediseñar el sistema del *feedlot* y de los corrales previos al biodigestor.

En un segundo ejemplo, se presenta el caso de una granja de cerdos, que ya cuenta con el dato de cuántos efluentes se generan por día (Gráfico 10).

Gráfico 10. Segundo ejemplo de dimensionamiento



Fuente: Elaborado por los autores.

En este caso, se parte de un efluente con características propias conocidas, como el porcentaje de MS (3%), y se puede optar por tres alternativas:

1. Tratar el efluente tal cual está, como en el ejemplo teórico del Gráfico 9.
2. Incorporar concentrador de sólidos para elevar el porcentaje de MS y reducir la carga diaria, disminuyendo también el tamaño del biodigestor. En este caso, solo valdrá la pena concentrar el efluente si el biodigestor que se está diseñando tiene la tecnología suficiente (sobre todo, un buen sistema de agitación y rompedor de costra) para tratar una mayor cantidad de sólidos en la mezcla.
3. Evaluar un incremento del porcentaje de MS utilizando un codigestor, como algún cultivo o silaje rico en energía u otro residuo orgánico sólido, permitiría obtener, en un mismo tamaño de biodigestor, mayor cantidad de biogás producido al incorporar más porcentaje de sólidos volátiles en la misma mezcla.

Bibliografía

- Ahn, H.K., M.C. Smith, S.L. Kondrad y J.W. White.** 2010. "Evaluation of biogas production potential by dry anaerobic digestion of switchgrass - animal manure mixtures", en *Applied Biochemistry and Biotechnology* Vol. 160 N.º 4. National Center for Biotechnology Information.
- Alburquerque, J.A., C. de la Fuente, A. Ferrer-Costa et al.** 2012. "Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues", en *Biomass & Bioenergy* Vol. 40 (disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.02.018>).
- Aparcana Robles, S. y A. Jansen.** 2008. "Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso 'fermentación anaeróbica' para producción de biogás". German-profEC (disponible en http://www.german-profec.com/cms/upload/Reports/Estudio%20sobre%20el%20Valor%20Fertilizante%20de%20los%20Productos%20del%20Proceso%20Fermentacion%20Anaerobica%20para%20Produccion%20de%20Biogas_ntz.pdf).
- Arellano-García, L., A.D. Dorado, M. Fortuny et al.** 2017. "Purificación y usos del biogás". Barcelona (España). Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) (disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/104859>).
- Babae, A. y J. Shayegan.** 2011. "Effect of organic loading rates (OLR) on production of methane from anaerobic digestion of vegetables waste", en *World Renewable Bioenergy Congress*, Linköping (Suecia). *Bioenergy Technology* N.º 5.
- Beil, M. y U. Hoffstede.** 2010. *Technical success of the applied biogas upgrading methods*, Kassel (Alemania). Fraunhofer IWES.
- Bernal Calderón, M.P. J.A., Alburquerque Méndez, M.A. Bustamante Muñoz, R.A. Albiach Vila, A. Bonmati Blasi, y R. Moral Herrero.** 2014. "Residuo a recurso. El camino hacia la sostenibilidad". *Uso agrícola de materiales digeridos: Situación actual y perspectivas de futuro*. Madrid. Ediciones Mundi-Prensa.
- Bioenergy Insight.** 2016. *Asia Biogas begins commercial operation at Thai biogas plant*. Edición en línea de Bioenergy Insight, 26 de enero de 2016 (disponible en http://www.bioenergy-news.com/display_news/10121/Asia_Biogas_begins_commercial_operation_at_Thai_biogas_plant/).
- Buswell, A.M. y W.D. Hatfield.** 1936. *Anaerobic Fermentations*. Boletín N.º 32, Urbana (EE.UU). Departamento de Registro y Educación del estado de Illinois.
- Carmona, J.C., D.M. Bolívar y L.A. Giraldo.** 2005. "El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo", *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* Vol. 18 N.º I, págs. 49 a 63.
- Casanovas, N.G.** 2015. "Producción y uso de fertilizantes obtenidos a partir de sustratos orgánicos digeridos anaeróbicamente. Su aplicación a un cultivo de maíz" (tesis de grado para el título de Ingeniero Agrónomo). Buenos Aires. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Chantigny, M.H., D.A. Angers, G. Bélanger, P. Rochette, N. Eriksen-Hamel, S. Bittman, K. Buckley, D. Massé y M-O. Gasser.** 2008. "Yield and nutrient export of grain corn fertilized with raw and treated liquid swine manure", *Agronomy Journal* Vol. 100 N.º 5, American Society of Agronomy.
- Charlón, V., M. Taverna, E. Walter y F. Manzi.** 2004. "Riego por aspersión: un posible destino de los efluentes del tambo". Información para divulgación, INTA Rafaela (disponible http://rafaela.inta.gov.ar/info/documentos/art_divulgacion/ad_0008.htm).
- Curtis, H., S.N. Barnes, A. Scnek y A. Massarini.** 2008. *Biología* (7.º ed. en español). Madrid. Editorial Médica Panamericana.
- Dalzell, H.A., K.G. Biddlestone y T. Thurairajan.** 1991. *Manejo del suelo: producción y uso del composte en ambientes tropicales y subtropicales*. Boletín de suelos N.º 56. FAO.
- Del Campo, O.** 2017. Galileo Technologies.
- Della Vecchia, F.** 2010. "Estudio de la producción de biogás a partir de residuos orgánicos prioritarios en la Argentina" (tesis de grado para el título de Ingeniero Agrónomo). Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.

- Departamento de Desarrollo y Eficiencia de Energía Alternativa.** 2016. *Reporte anual 2015*. Ministerio de Energía de Tailandia (disponible en <http://weben.dede.go.th/webmax/>).
- Deublein, D. y A. Steinhauser.** 2008. *Biogas from waste and renewable resources, an introduction*. Londres. Wiley-VCH Publishing House.
- EG&G Technical Services Inc.** 2004. *Fuel Cell Handbook* (Seventh Edition). Morgantown (EE.UU.). Departamento de Energía de Estados Unidos (disponible en: <https://www.netl.doe.gov/File%20Library/research/coal/energy%20systems/fuel%20cells/FCHandbook7.pdf>).
- EurObserv'ER.** 2014. *Biogas Barometer 2014*. Observ'ER (disponible en: <https://www.eurobserv-er.org/?s=biogas+barometer+2014>).
- FAO.** 2019. *Relevamiento Nacional de Biodigestores. Relevamiento de plantas de biodigestión anaeróbica con aprovechamiento energético térmico y eléctrico*. Buenos Aires.
- Fedailaine, M., K. Moussi, M. Khitous, y S. Abada.** 2015. "Modeling of the anaerobic digestion of organic waste for biogas production", *Procedia Computer Science* N.º 52. Elsevier.
- Ferrero, J.C., M. Bargiela, G. Fernández, A.E. Rendina, y A. F. de Iorio.** 2008. "Estimación del efecto de inhibidores para la producción de biogás a partir de desechos sólidos urbanos", en M. A. Dos Santos Alfonso y M. Torres (eds.), *Libro de actas del V Congreso iberoamericano de física y química ambiental*. Buenos Aires. Universidad Nacional de Gral. San Martín.
- Forster-Carneiro, T., M. Pérez, L.I. Romero y D. Sales.** 2007. "Dry-thermophilic anaerobic digestion of organic fraction of the municipal solid waste: focusing on inoculum sources", en *Bioresource Technology* Vol. 98 N.º 17, 3195-3203, National Center for Biotechnology Information.
- Fuchs, J.C., A. Berner, J. Mayer, E. Smidt y K. Schleiss.** 2008. "Influence of compost and digestates on plant growth and health: potentials and limits", *Actas del International Congress CODIS 2008*, 27 al 29 de febrero de 2008, Solothurn (Suiza).
- GIZ.** 2017. *Thailand bioenergy policy. Update 01/2017*. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (disponible en: <http://www.thai-german-cooperation.info/admin/uploads/publication/5a2256aec0b15c261111827ca0517761en.pdf>). Acceso septiembre de 2017.
- Grassi, A.E.** 2015. "Biofertilización del cultivo de trigo y evaluación del efecto sobre la calidad y rendimiento: nuevas perspectivas para el mercado argentino" (tesis de grado para el título de Ingeniero Agrónomo). Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.
- Hagmann, M., E. Hesse, P. Hentschel y T. Bauer.** 2001. "Purification of biogas-removal of volatile silicones", *The Eight International Waste Management and Landfill Symposium* (II). Cagliari (Italia). Litotipografia Kalb.
- Higgins, V.L.** 2007. *Siloxane removal process*. Patente de EE.UU. N.º 7 306 652. Assignee Parker-Hannifin Corporation, 2007.
- Hilbert, J.A.** 2010. *Manual para la producción de biogás*. Instituto de Ingeniería Rural – INTA Castellar. Buenos Aires. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Hingerl, K.** 2011. "The need for research towards biogas usage in fuel cells - A strategic question for the european energy autonomy", *Scientific Report ESF/PESC*, 1-3 de abril de 2001. Steyr (Austria). European Science Foundation.
- Huppmann, R., H.W. Lohoff y H.F. Schröder.** 1996. "Cyclic siloxanes in the biological waste water treatment process – Determination, quantification and possibilities of elimination", en *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry* Vol. 354 N.º 1. Springer-Verlag (disponible en: <https://doi.org/10.1007/s002169600011>).
- Islam, M.R., S.M.E. Rahman, M.M. Rahman, D.H. Oh y C.S. Ra.** 2010. "The effects of biogas slurry on the production and quality of maize fodder", *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* Vol. 34 N.º 1. Tübitak (disponible en doi:10.3906/tar-0902-44).
- Jayasinghe, P.A., J.P. Hettiaratchi, A.K. Mehrotra y S. Kumar.** 2011. "Effect of enzyme additions on methane production and lignin degradation of landfilled sample of municipal solid waste", en *Bioresource Technology* Vol. 102 N.º 107. National Center for Biotechnology Information (disponible en: DOI: 10.1016/j.biortech.2011.01.013).
- Kohl, A.L. y R. Nielsen.** 1997. *Gas Purification* (5.ª edición). Gulf Professional Publishing (disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-88415-220-0.X5000-9>).

- Lei, Z., J. Chen, Z. Zhang, y N. Sugiura.** 2010. "Methane production from rice straw with acclimated anaerobic sludge: effect of phosphate supplementation", en *Bioresource Technology* Vol. 101, N.º 12 (disponible en: DOI: 10.1016/j.biortech.2010.01.083).
- Leitón, J.** 2015. "Purificación de biogás utilizando agua a presión óxido de calcio y carbón", en *Revista Científica* Vol. 25 N.º 1. Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Lossie, U. y P. Pütz.** 2008. *Control orientado de plantas de biogás con la ayuda de FOS/TAC*. Informe práctico. Análítica de laboratorio. Hach Lange.
- McCabe, J. y W. Eckenfelder.** 1957. *Biological treatment of sewage and industrial wastes*. Nueva York (EE.UU.). Reinbold Publishing.
- Menna, M., G. Murcia, J. Branda, G. Belliski, E. Garin y E. Moschione.** 2007. "Metodología de bajo costo para la cuantificación de biogás en biodigestores de laboratorio", en *Avances en energías renovables y medio ambiente* Vol. 11. ASADES (disponible en: <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2007/2007-t008-a015.pdf>).
- MEyM.** 2016. Plan de Energías Renovables en Argentina - Programa RenovAr. Ronda 1 (disponible en <http://www.eeeuu.mrecic.gov.ar/userfiles/v7/presentacion-energia-espanol-6%282%29.pdf>).
- MEyM.** 2017. *Tabla de conversiones energéticas*. Ministerio de Energía y Minería (disponible en: <http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3622>).
- Meynell, P.J.** 1976. *Methane: planning a digester*. Nueva York (EE.UU.). Schocken Books.
- Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali.** 2016. Decreto 16A02762, *Criteri e norme tecniche generali per la disciplina regionale dell'utilizzazione agronomica degli effluenti di allevamento e delle acque reflue, nonche' per la produzione e l'utilizzazione agronomica del digestato*, 25 de febrero de 2016. Roma. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana (disponible en: http://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario%3Fatto.dataPubblicazioneGazzetta%3D2016-04-18%26atto.codiceRedazionale%3D16A02762&rct=j&frm=1&q=&esrc=s&sa=U&ved=0ahUKEwjrx7Kn1cP-QAhWEzRoKHb_EBvMQFggfMAI&usg=AFQjCN-HlmPLBAMGkNzhXllo6Qp94itAWLg).
- Möller, K. y T. Müller.** 2012. "Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: a review", en *Engineering in Life Sciences* Vol. 12 (disponible en: DOI: 10.1002/elsc.201100085).
- Monopoli, G.** 2017. Air Liquide (entrevista de F.J. Vecchia).
- Montemurro, F., D. Ferri, F. Tittarelli, S. Canali y C. Vitti.** 2010. "Anaerobic digestate and on-farm compost application: effects on lettuce (*Latuca Sativa* L.) crop production and soil properties", en *Compost Science & Utilization* Vol. 18 N.º 3 (disponible en DOI: 10.1080/1065657X.2010.10736954).
- Mumme, J., B. Linkey y R. Tölle.** 2010. "Novel up-flow anaerobic solid-state (UASS) reactor", en *Bioresource Technology* Vol. 101 N.º 2. ScienceDirect. Elsevier (disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.073>).
- Notter, D.A., K. Kouravelou, T. Karachalios, M. Daletou y N. Tudela Haberland.** 2015. "Life cycle assessment of PEM FC applications: electric mobility and μ -CHP", en *Energy & Environmental Science*, N.º 7. Royal Society of Chemistry (disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/getauthorversionpdf/C5EE01082A>).
- Ortega Rodríguez, M.** 2001. *Energías Renovables*. Madrid. Ediciones Paraninfo.
- Pérez Martínez, M., M.J. Cuesta Santianes, S. Núñez Crespi y J.A. Cabrera Jiménez.** 2008. *Utilización de biogás en pilas de combustible*. Madrid. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).
- Estado de California.** 2014. Proyecto de ley N.º 1826 C 727. California (Estados Unidos) (disponible en: https://leginfo.legislature.ca.gov/faces/billNavClient.xhtml?bill_id=201320140AB1826).
- Estado de Connecticut.** 2011. Proyecto de ley N.º 1116 Acto Público N.º 11-217. Connecticut (Estados Unidos) (disponible en: <https://www.cga.ct.gov/2011/ACT/Pa/pdf/2011PA-00217-ROOSB-01116-PA.pdf>).
- RenovAr.** 2017. *Proyectos adjudicados del Programa RenovAr. Rondas 1, 1.5 y 2*. MINEM (disponible en: <https://www.minem.gob.ar/www/833/25897/proyectos-adjudicados-del-programa-renovar.html>).

- Riaño, B., B. Molinuevo y M.C. García-González.** 2011. "Potential for methane production from anaerobic co-digestion of swine manure with winery wastewater", en *Bioresource Technology* Vol. 102 N.º 5. National Center for Biotechnology Information (disponible en: DOI: 10.1016/j.biortech.2010.12.077).
- Richards, L.A.** 1985. *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Ed. Limusa.
- Ríos, N., C. Crespo, L. Terrazas y M. Álvarez.** 2007. "Aislamiento de cepas anaeróbicas termófilas productoras de celulasas y hemicelulasas implicadas en la producción de bioetanol mediante técnicas de cultivo y aislamiento tradicionales y no tradicionales", *BIOFARBO*, Vol. 15 N.º 1. La Paz. Colegio de Bioquímica y Farmacia de Bolivia. Págs. 43-50.
- Soria Fregoso, M., R. Ferrera Cerrato, J. Etchevers Barra, G. Alcántar González, J. Trinidad Santos, L. Borges Gómez y G. Pereyda Pérez.** 2001. "Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. *Terra Latinoamericana* Vol. 19 N.º 4. Chapingo (México). Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/573/57319408.pdf>).
- Schuldt, M. y H.P. Belaustegui.** 1996. *Los residuos sólidos urbanos (RSU). Alternativas para el tratamiento de la fracción compostable (orgánica)*. Museo de la Plata Vol. 2 N.º 8.
- Schweigkofler, M. y R. Niessner.** 2001. "Removal of siloxanes in biogases", en *Journal of Hazardous Materials* Vol. 83 N.º 3. Elsevier Science (disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00318-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00318-6)).
- Simet, A. y K. Fletcher.** "Biogas Advances in the US", en *Biomass Magazine* (disponible en: <http://biomassmagazine.com/articles/14135/biogas-advances-in-the-us>).
- Soreanu, G., M. Béland, P. Falletta, K. Edmonson y P. Seto.** 2008. "Laboratory pilot scale study for H₂S removal from biogas in an anoxic biotrickling filter", en *Water Science & Technology* Vol. 57 N.º 2. IWA Publishing (disponible en <https://doi.org/10.2166/wst.2008.023>).
- Souza, J. y L. Schaeffer.** 2013. "Sistema de compresión de biogás y biometano", en *Información Tecnológica* (edición en línea) Vol. 24 N.º 6 (disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000600002>).
- Varnero, M.T. y J. Arellano.** 1990. *Aprovechamiento racional de desechos orgánicos*. Santiago de Chile. FIA. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de Chile.
- Varnero, M.T., M. Carú, K. Galleguillos y P. Achondo.** 2012. "Tecnologías disponibles para la purificación de biogás usado en la generación eléctrica", en *Información tecnológica* Vol. 23 N.º 2. La Serena (Chile) (disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642012000200005>).
- Vogt, G.M., H.W. Liu, K.J. Kennedy, H.S. Vogt y B.E. Holbein.** 2002. "Super blue box recycling (SUBBOR) enhanced two-stage anaerobic digestion process for recycling municipal solid waste: laboratory pilot studies", en *Bioresource Technology* Vol. 85 N.º 3. National Center for Biotechnology Information.
- Wang, Y., K.S. Chen, J. Mishler, S.C. Cho y X.C. Adroher.** 2011. "A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: technology, applications, and needs on fundamental research", *Applied Energy* Vol. 88, N.º 4 (disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.030>).
- Wheless, E. y J. Pierce.** 2004. "Siloxanes in landfill and digester gas. Update", 27.º *Simposio anual SWANA LFG*, marzo de 2004. (disponible en: <http://www.scsengineers.com/scs-white-papers/siloxanes-in-landfill-and-digester-gas-update/>).
- Wellinger, A. y A. Lindberg.** 2001. *Bioenergy Task 24: Biogas upgrading and utilization*, International Energy Agency Bioenergy.
- Zhang, L., P. De Schryver, B. De Gussemme, W. De Muijnck, N. Boon y W. Verstraete.** 2008. "Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: A review", en *Water Research* Vol. 42. Science Direct. Elsevier (disponible en: http://www.academia.edu/16634166/Chemical_and_biological_technologies_for_hydrogen_sulfide_emission_control_in_sewer_systems_A_review).
- Zhang, L., Y.W. Lee y D. Jahng.** 2011. Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: focusing on the role of trace elements, *Bioresource Technology* N.º 102.

ANEXO

Instructivo para el diseño de biodigestores domiciliarios y en *batch* para laboratorio



Los biodigestores de laboratorio permiten obtener, en un corto plazo, datos fundamentales como cuál es el potencial de biogás de un sustrato determinado, su curva de producción, las características del digerido, entre otros.

A continuación, se presentan algunas recomendaciones para la construcción de equipos caseros, que pueden armarse utilizando materiales adquiridos en ferreterías o comercios de sanitarios.

Estos instructivos son para tres modelos:

- biodigestores rígidos a base de tanques de agua comerciales;
- biodigestores de membrana;
- mini biodigestores para hacer ensayos de tipo *batch*.

Biodigestor rígido

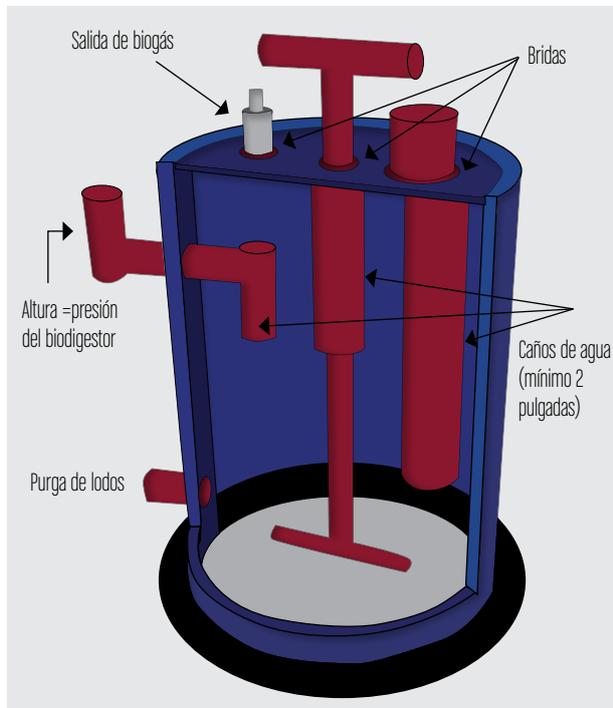
Una alternativa sencilla para armar un biodigestor continuo es mediante la transformación de tanques de agua prefabricados (Gráfico 11).

A continuación se enumeran los elementos necesarios para proyectar un biodigestor de estas características. Algunos de ellos son imprescindibles,

mientras que la incorporación de opcionales representa una alternativa para mejorar el funcionamiento del equipo:

- Entrada para alimentación
- Salida de efluentes
- Salida de biogás
- Válvula de seguridad
- Trampa de agua
- Filtro de sulfhídrico
- Gasómetro (opcional)
- Sistema de agitación (opcional)
- Toma de muestras (opcional)
- Sistema de calefacción (opcional)

De acuerdo con el tipo de tanque utilizado pueden existir variaciones en el diseño del biodigestor, por lo que este planteo constituye una propuesta de referencia para entender el concepto y luego poder adaptarlo a cualquier tanque.

Gráfico 11. Biodigestor rígido de laboratorio

Fuente: Elaborado por los autores.

Listado de materiales necesarios para la construcción:

- Accesorios de polipropileno (PPN):
 - Tanque de agua
 - Bridas de 2 pulgadas
 - Bridas de $\frac{3}{4}$ pulgada
 - Cañerías de PPN
- Válvulas esféricas de PVC
- Manguera de riego negra o mangueras de cristal transparentes
- Sella roscas
- Cinta de teflón

Las bridas son elementos de los sistemas de tuberías que permiten realizar conexiones entre las

partes y evitan las roturas durante los procesos de ensamblado y desmonte, por lo que colaboran con la integridad estructural de los sistemas. En este caso, las bridas permiten crear tanto las tuberías de entrada y salida del efluente como la de salida del biogás a través de la pared del tanque. Como recomendación, para las cañerías que involucren movimiento de líquidos, ya sean entradas o salidas, no deben usarse accesorios ni caños inferiores a 2 pulgadas, ya que diámetros menores generalmente conducen a taponamientos y obstrucciones con la materia orgánica del biodigestor. Son preferibles elementos y accesorios de mayor diámetro, pero los de 2 pulgadas suelen conseguirse fácilmente a precios económicos. Sin embargo, en biodigestores que superen los 100 litros, es recomendable trabajar con entradas y salidas superiores (110 o 160 mm), con el objetivo de facilitar la operación del biodigestor.

En la construcción, el caño de entrada de alimentación suele llegar casi hasta el fondo del biodigestor. De esta manera, se asegura que el mismo líquido dentro del tanque funcione como un sello hidráulico para evitar el escape del gas. Se puede incorporar en forma opcional una llave esférica, para cerrar todo el sistema y transportarlo sin pérdidas de líquidos o gases.

Para sistemas con descarga por nivel, es común encontrarse con que la salida del efluente tratado (digerido) no es recta, sino que sube unos centímetros (cm) en forma de S. Esto es así ya que, una vez que se define el nivel del líquido deseado dentro del tanque, hay que calcular la presión de trabajo, que puede cuantificarse como centímetros de altura de la columna de agua. En este tipo de sistemas se manejan bajas presiones, que rara vez superan los 10 mbar, lo que equivale a una altura de 10 cm de columna de agua. Si esa fuera la presión de trabajo elegida, la salida deberá ascender 10 cm; si fuera de 5 mbar, la altura podría ser de 5 cm.

Para el sistema de agitación pueden usarse los mismos accesorios de polipropileno o algún sistema casero fabricado con diversos materiales que funcionen como paletas. Para su colocación, sin tener que usar sellos mecánicos especiales o ma-

teriales más difíciles de conseguir, puede usarse el mismo principio que con el caño de alimentación, haciendo un sello hidráulico con caños de PPN y bridas, que funcionen como guía de esas paletas. Incluso en la base del tanque se puede soldar o poner otra guía y, de esta manera, la paleta o sistema de agitación se mantiene estable.

Si el nivel del líquido está muy próximo a la superficie del tanque y se cierran las salidas de biogás, puede ocurrir que el biodigestor comience a perder líquido por los sellos hidráulicos de la cañería de entrada y de agitación al elevarse la presión. En estas circunstancias, resulta importante contar con una válvula de seguridad para ventear el biogás a alta presión y prevenir las pérdidas de efluentes.

Pueden agregarse salidas en el cuerpo del biodigestor a diferentes alturas si se quiere tomar muestras para evaluar la eficiencia del proceso. Es necesaria una gran prolijidad al colocar bridas (o conexiones tanque) sobre las paredes de tanques redondos, ya que una mala colocación puede acarrear pérdidas de líquidos o gases. La utilización de tanques cuadrados o con superficies rectas puede presentar una ventaja frente a los tanques cilíndricos convencionales. Algunos tanques de agua se encuentran preparados y cuentan con superficies planas para la instalación de accesorios.

Para el sistema de calefacción existen varias opciones. Algunas de las más usadas son:

- Resistencias eléctricas conectadas directamente al biodigestor: si bien presentan la ventaja de que pueden acoplarse a termostatos para regular la temperatura, resulta fundamental contar con un adecuado asesoramiento para su instalación y seguimiento, puesto que trabajan conectadas a la red eléctrica.
- Sistemas de calefacción con serpentinas internas: para su instalación se coloca una manguera de riego enrollada dentro del biodigestor con una entrada y una salida. Esta cañería se conecta a un sistema de calefacción (resistencias eléctricas, calefactores solares, calderas, por ejemplo) junto con una bomba pequeña, similar a la que se usa en peceras. De esta forma,

se puede mover el agua caliente por toda la serpentina y así dar temperatura al biodigestor.

- Sistemas de calefacción con serpentinas externas: conceptualmente equivalen al anterior, pero por ser externos al digestor pueden ser separados para su reparación o modificación, sin tener que vaciar el reactor ni interrumpir el proceso de biodigestión. Es importante entender que si se incorpora un sistema para calefaccionar el biodigestor, resulta también razonable aislarlo térmicamente, para evitar pérdidas del calor generado. Entre las opciones más frecuentes de aislamiento puede destacarse:

- Fibra de vidrio
- Membranas aislantes
- Rollos de polietileno aislante
- Rollos de embalar con burbujas
- Poliuretano expandido
- Poliestireno expandido (comercialmente conocido como telgopor)

La salida del biogás puede tener un diámetro menor al de la entrada de líquidos. Sin embargo, no es recomendable usar tuberías de diámetros muy pequeños, ya que en el proceso de biodigestión frecuentemente se generan burbujas que pueden tapar las salidas de biogás. Un diámetro de $\frac{3}{4}$ o de 1 pulgada son apropiados, así como la instalación de una válvula esférica de PVC para poder abrir y cerrar el sistema fácilmente. Para la conducción pueden ponerse reducciones y usar mangueras de riego negras o mangueras de plástico o cristal de $\frac{3}{4}$ o $\frac{1}{2}$ pulgada.

La válvula de seguridad es un sistema muy sencillo de fabricar, que puede funcionar al mismo tiempo como trampa de agua y regulador de la presión dentro del sistema. Lo ideal es colocarla lo más próxima posible al biodigestor, para que en caso de que no se utilice el biogás y este comience a levantar presión dentro, el sistema tenga un punto rápido de descarga. En la cañería de salida de biogás, se coloca una tee (1 entrada y 2 salidas).

Una salida continúa su recorrido hasta el punto de utilización del biogás, y la otra se conecta a una botella con agua (Gráfico 12).

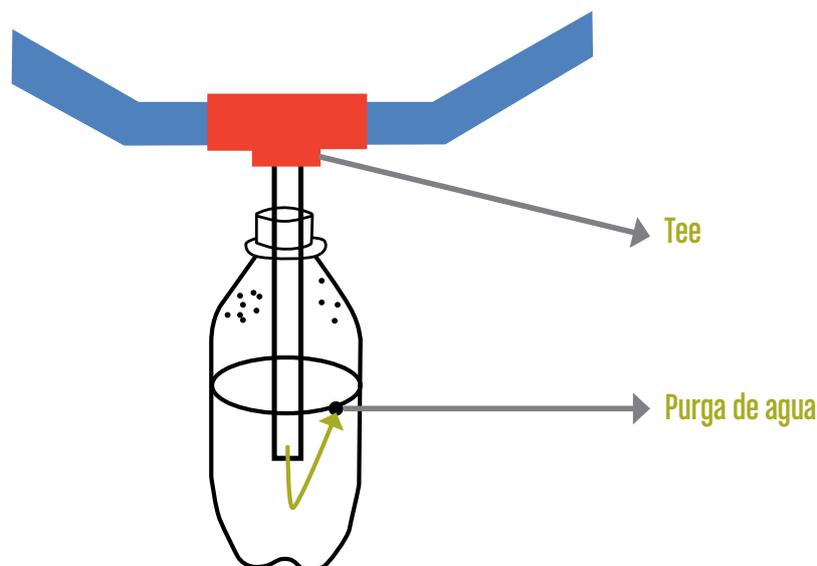
Por cada centímetro que se introduzca la cañería dentro del agua, la presión de trabajo para superarlo será de 1 mbar. De esta manera, si la cañería queda inmersa 5 cm por debajo del agua, la presión del biodigestor máxima será de aproximadamente 5 mbar. Cuando se supere esa presión, el biogás burbujeará y escapará por la botella. Es necesario hacer una salida para el agua a la altura máxima deseada; en caso contrario, cuando se condense el agua en la botella el nivel subirá y, del mismo modo, la presión de trabajo máxima deseada, pudiendo comprometer los equipos. Hay que tener en cuenta además que cuanto mayor sea la distancia desde el biodigestor hasta el equipo que utiliza el biogás, mayor será la presión de trabajo dentro del reactor.

Este mismo sistema puede funcionar como una trampa de agua. En el biodigestor, sobre todo si se trabaja en un rango de temperatura mesofílica o termofílica, se generan vapores de agua que pueden tapan las cañerías y evitar que el biogás

llegue a su destino. Lo ideal entonces es que toda la cañería de biogás tenga una pendiente hacia una trampa de agua, que funciona como una segunda válvula de seguridad. Como la válvula de seguridad estará próxima al biodigestor, conviene que la trampa de agua se encuentre próxima al lugar de uso, y que toda la pendiente de la cañería conduzca a ese punto, logrando así que el agua condense en la botella. Posteriormente, se le hace un agujero para purgar el agua en exceso, si no, ella misma, por condensación, puede llegar al nivel de la cañería y tapanla. Los sistemas de conducción del biogás deberían estar lo más tensos posibles, ya que si se forman depresiones en la cañería y en la misma condensa agua, se genera una resistencia. Cuanto mayor sea la depresión, mayor la presión necesaria para superarla, lo que puede comprometer los equipos.

Para la construcción de filtros de sulfhídricos caseros, lo mejor es utilizar algún derivado de metal que permita la retención del sulfuro de hidrógeno (H_2S). Lo más sencillo es la utilización de virulana oxidada, lanas de acero o de hierro, viruta de hierro, entre otros materiales. Si la cantidad de biogás que

Gráfico 12. Ejemplo de válvula de seguridad



Fuente: Elaborado por los autores.

Imagen 29. Fases del armado de un filtro de sulfhídrico domiciliario



© IFES

se genera es pequeña, en algunos casos puede introducirse en la misma cañería de biogás o, en su defecto, armar un recipiente que opere de forma externa a la línea. También pueden usarse materiales celulósicos, como chips de madera o carbón activado, para que funcionen como medios en los que crecen microorganismos sulfuroreductores, que captan el sulfuro de hidrógeno del biogás.

El filtro de la Imagen 29 está construido sobre un tubo de 110 mm de PVC. En cada extremo se ha colocado una tapa de caño con una brida para conectarlo a la línea de biogás. Como se ve en la imagen, pueden utilizarse tapas con rosca para caños de PVC. De esta manera, se simplifica el recambio de la viruta de hierro o del material filtrante elegido.

En el caso de que se trabaje con PVC, para pegarlo siempre es recomendable lijar las superficies a unir y utilizar pegamento líquido para PVC. Se recomienda el uso de accesorios como uniones dobles, ya que permiten enroscar y desenroscar fácilmente las piezas sin necesidad de cortar ni dañar los equipos.

El gasómetro o gasómero es el recipiente que va a permitir almacenar el biogás producido en el reactor e incrementar la presión. En los sistemas caseros, dos tipos son los más utilizados:

- Gasómetros de membrana o material flexible.
- Gasómetros rígidos tipo campana.

Gasómetro flexible

Dentro del biodigestor, se suele dejar un espacio para almacenamiento de biogás, de forma tal que nunca el nivel del líquido complete el 100% del volumen del reactor. Lo ideal es que ese espacio represente entre el 20% y el 30% del volumen. De esta forma, en un biodigestor de 100 litros, se tendrá un volumen de líquido de 70-80 litros y 20-30 litros de biogás.

Se pueden utilizar desde cámaras de vehículos hasta gasómetros específicamente construidos con geomembranas de PVC (Imagen 30), EPDM, PDA o plásticos. En este tipo de gasómetros, es ideal tener una entrada y salida de biogás, y una purga de líquidos en caso de que pase agua. Las entradas y salidas se pueden hacer fácilmente con las bridas de

polipropileno. Las geomembranas pueden pegarse utilizando pistolas de calor adaptadas a este uso, que se consiguen fácilmente en el mercado.

En lo posible, es importante mantener el gasómetro al resguardo del sol, de los vientos y de las lluvias, para maximizar su vida útil y preservar las condiciones de seguridad.

Gasómetro rígido tipo campana

Por la facilidad de construcción y eficiencia, es común encontrar gasómetros tipo campana, que no son otra cosa que un tanque invertido colocado dentro de otro de mayor diámetro (Gráfico 13).

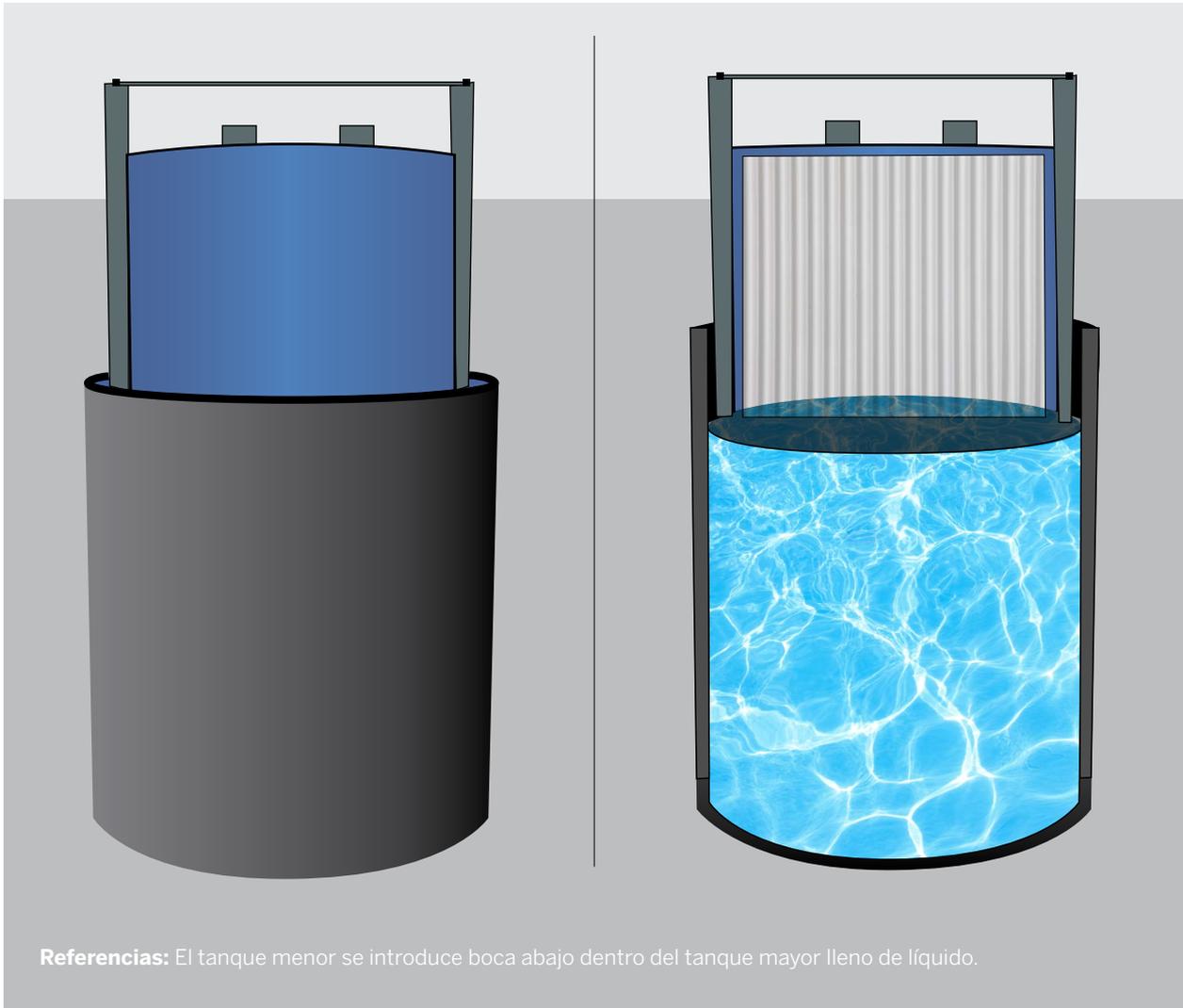
Este tipo de campanas es muy usado en diversos sistemas, no sólo para biogás. Cuando la campana se llena de biogás, el tanque interno asciende.

Imagen 30. Gasómetro de membrana de PVC con filtro de sulfhídrico y válvula de seguridad incorporada



© Fundación Energizar

Gráfico 13. Campana hecha con tanques y corte transversal



Fuente: Elaborado por los autores.

En la parte superior del tanque puede ponerse lastre o peso, para generar presión, además de instalar guías laterales para evitar movimientos y caídas durante su subida. Las campanas pueden construirse a partir de diversos materiales, desde tanques de agua prefabricados, hasta estructuras de hormigón y acero, pero operan todas bajo los mismos principios.

Biodigestor tubular de membrana

Su tamaño dependerá de la zona en la que se encuentre, de la cantidad de efluente que se necesite procesar diariamente y de la cantidad de energía que se busque producir. A continuación, una serie de recomendaciones para el armado de este tipo de biodigestores, independientemente del material que se use y/o del tamaño de construcción propuesto.

Básicamente se trata de biodigestores más largos que anchos, con una relación longitud/diámetro en lo posible superior a 3. Pueden tener una o dos salidas. En muchos casos, se agrega una segunda salida que va bien al fondo del biodigestor y se deja cerrada, para utilizar exclusivamente en operaciones de mantenimiento (succión de lodos con sistemas de limpieza sépticos) o para evitar la colmatación del biodigestor (Gráfico 14).

El biodigestor tubular puede instalarse directamente sobre el suelo, sobre un pozo o zanja excavado previamente que le dará estructura, protegiéndolo de contingencias climáticas y facilitando su uso. El largo y ancho del pozo dependerá del diseño, del tamaño del biodigestor y/o de los rollos tubulares que se puedan conseguir. El ancho se puede llegar a corregir realizando pliegos en caso de tener rollos muy grandes.

El pozo debería intentar simular una forma trapezoidal (Imagen 31), siendo más angosto en profundidad y más ancho en superficie, de forma de brindar un soporte adecuado al biodigestor.

Posteriormente, lo ideal es cubrir el suelo con algún tipo de material que brinde protección a la membrana y al biodigestor, evitando rajaduras y daños (Imagen 32). Será también importante armar una estructura tipo invernáculo, que no sólo evitará que se pierda calor en el sistema y

colaborará con el aislamiento térmico, sino que principalmente protegerá al biodigestor de vientos, lluvias y daños mecánicos que se pueden producir en la superficie por exposición directa a los agentes climáticos.

Finalmente y no menos importante es intentar aislar el biodigestor del suelo, ya que las principales pérdidas de calor en estos sistemas se dan en la masa de agua que tiene contacto directo con el suelo. Pueden usarse materiales orgánicos, como pajas de trigo o algún cultivo seco, pero con el tiempo se degradan y pierden eficiencia. Como alternativa, pueden utilizarse planchas de telgopor, poliuretano expandido, lana de vidrio, rollos de embalaje aislante, etc. Cuanto mayor sea el espesor del aislante, menor será la pérdida de calor del sistema (Imagen 33).

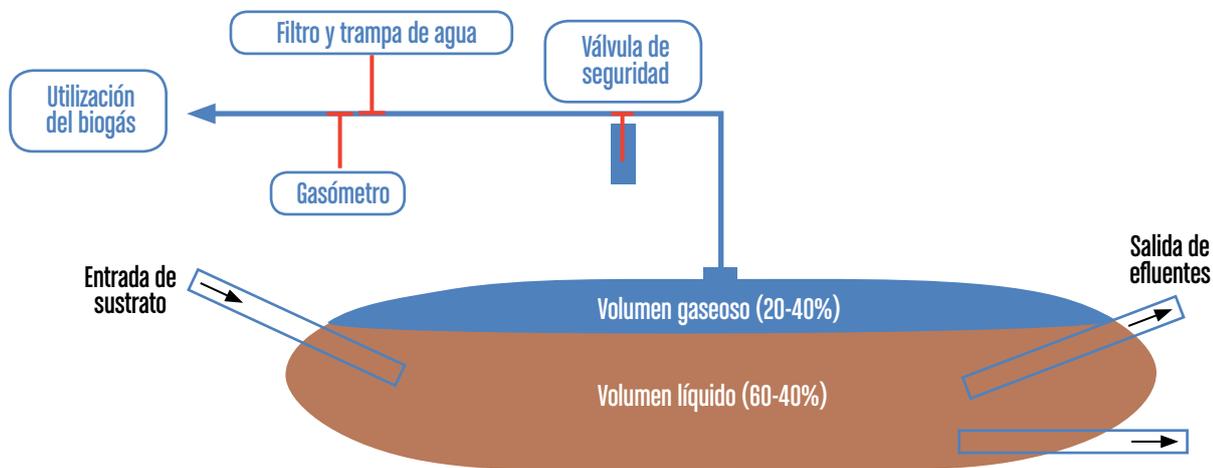
En estos biodigestores, garantizar que la temperatura no descienda por debajo de los 10-15°C será clave para evitar que la actividad microbiana resulte afectada.

Los materiales para la construcción de un biodigestor tubular son sumamente diversos, desde geomembranas de PVC, EPDM, PDA, o polímeros de plásticos tipo polietileno con distintas densidades y espesor. La elección de uno u otro debería realizarse teniendo en cuenta sus propiedades y beneficios técnicos, pero la realidad es que el precio y la disponibilidad local terminan siendo los factores predominantes.

Materiales:

- Membrana o rollo plástico
- Brida de por lo menos 1 pulgada para la salida de biogás
- Manguera de riego de ¾ o ½ pulgada
- Caño de PVC de 160 mm
- Aislantes
- Tanque de salida de efluentes
- Botella de plástico para válvula de seguridad
- Filtro y trampa de agua
- Gasómetro (opcional)

Gráfico 14. Modelo de biodigestor tubular



Fuente: Elaborado por los autores.



Imagen 31. Instalación de biodigestor tubular

Imagen 32. Instalación de estructura para nylon cobertor



© IFES



© IFES

Imagen 33. Biodigestor tubular con aislante de lana de vidrio

Preferentemente, debería intentarse conseguir rollos tubulares, donde el cilindro ya esté formado. De esta manera, se corta el largo que se quiere para el biodigestor y en los extremos se introducen los caños de PVC de por lo menos 1 metro de largo, para garantizar que los mismos queden por debajo del nivel del líquido y no haya pérdidas de biogás.

Para sellar el biodigestor a los caños de entrada y salida, en caso de que se disponga de un rollo tubular, se pueden usar gomas elásticas o cámaras de neumáticos para apretar la membrana a los caños de entrada (Imagen 34).

Otra alternativa implica directamente valerse del mismo material del biodigestor. Para ello, se arma una funda sobre un molde para la entrada del caño que se desea utilizar, y luego se pega. En otros casos pueden conseguirse en el mercado bridas de silicona que se sueldan a la membrana con calor y sirven además como guía de entrada para las cañerías.

Para la salida del biogás pueden utilizarse bridas de polipropileno, que se sueldan a la membrana en la parte superior, utilizando una pasta sellaroscas de uso comercial que evite cualquier pérdida de gases. En caso de tener biodigestores muy largos, se pueden instalar dos o varias salidas.

A partir de este punto en adelante, los pasos a seguir y los implementos a utilizar son los mismos que se detallaron para la construcción de un biodigestor rígido:

Imagen 34. Boca de entrada de biodigestor tubular hecha con silicona



© IFES

Una de las formas más sencillas de obtener inóculo para aplicar en un biodigestor es utilizar estiércol de animales, en especial de rumiantes, ya que se encuentra enriquecido con microorganismos anaeróbicos.

- Válvula de seguridad
- Trampa de agua
- Filtro de sulfhídrico
- Gasómetro (opcional)
- Sistema de agitación (opcional)
- Toma de muestras (opcional)
- Sistema de Calefacción (opcional)

Biodigestor batch

Los sistemas en *batch* son equipos que cuentan con una importante cantidad de ventajas:

- Permiten estudiar y comprender el comportamiento de un sustrato en un proceso de biodigestión.
- Permiten realizar en poco tiempo ensayos con diferentes sustratos modificando las principales variables operativas.
- Son económicos.
- Son de fácil construcción.
- Son de gran utilidad para el uso académico en escuelas y universidades.

Se puede construir este tipo de biodigestores sobre una gran cantidad de envases y materiales. Las botellas descartadas de gaseosas son una alternativa más que atractiva, pues al beneficio del reciclado se agrega el de su utilización en proyectos

de estudio e investigación. Presentan la ventaja de soportar elevadas presiones internas, requisito de seguridad imprescindible en experiencias con presiones de trabajo potencialmente elevadas.

Para adaptar una botella de gaseosa y transformarla en un biodigestor, basta con realizar unos sencillos cambios sobre la tapa de la botella.

Los materiales que se necesitan son:

- Botella de gaseosa con tapa
- Llavín
- Tuerca
- *O-ring*
- Espiga o acople rápido

Tras hacer un pequeño agujero sobre la tapa de la gaseosa, se pasa la rosca de un llavín y, del otro lado, se pone un *O-ring* y una tuerca para ajustar. El *O-ring* evita cualquier pérdida de biogás y sella la tapa con el llavín (Imágenes 35 y 36). Con un compresor de aire se puede comprobar fácilmente si hay pérdidas en las conexiones, llenando con aire a presión y sumergiendo la botella completa en agua.

Sobre el llavín se puede poner directamente una espiga o algún tipo de acople rápido para gas o aire. El tener acople rápido es útil cuando se realizan ensayos científicos con muchos biodigestores

en *batch* en forma simultánea, ya que facilita las mediciones diarias de producción de biogás.

Manómetro

Para medir la producción de biogás en este tipo de biodigestores pueden utilizarse manómetros caseros, aunque de alta precisión si se encuentran bien contruidos. Estos dispositivos miden la producción diaria de biogás a temperatura ambiente y presión atmosférica, mediante el desplazamiento de agua en una columna.

Para la construcción de un manómetro de estas características es necesario:

- Tubos de PVC de 110 mm
- Manguera de cristal de ½ pulgada
- 3 a 4 llaves esféricas de ½ pulgada
- 5 bridas de media pulgada
- Reducción de ½ pulgada a 3/8
- Acople rápido hembra

Este tipo de manómetros funcionan por desplazamiento de agua. Para su correcta operación es necesario utilizar agua con 5% de ácido clorhídrico (HCl), para evitar que el dióxido de carbono se diluya en el agua y subestimar la producción de biogás.

Imagen 35. Llavín de paso de gas para digestor *batch* de laboratorio



© IFES

Imagen 36. Sellado de salida de gas para digestor *batch* de laboratorio



© IFES

El manómetro se compone de dos torres: una cerrada con una conexión a las botellas y con una salida de biogás, y otra abierta (Gráfico 15). Ambas disponen de un medidor transparente de nivel (manguera de cristal).

Para ajustar la medición del sistema y minimizar errores, previamente se hace una calibración, lo que permita obtener una fórmula de conversión de la altura del líquido a la cantidad de agua desplazada.

. **Paso 1:** se abre la válvula de entrada de biogás hasta que los niveles de las dos torres estén iguales y se marca la altura del nivel de la torre 2. Al mismo tiempo, se abre la llave esférica que conecta ambas torres (llave de nivelación).

. **Paso 2:** se introduce una determinada cantidad de biogás por la llave de entrada de biogás y se cierra. Al hacer esto, se genera una diferencia de altura (para calibrar se puede ingresar aire soplando o con algún compresor).

. **Paso 3:** se mide la diferencia de altura en la torre 2.

. **Paso 4:** se cierra la llave de nivelación que conecta las torres.

. **Paso 5:** se abre la llave esférica de salida de agua para vaciar la torre 2 hasta que los dos niveles se igualen.

. **Paso 6:** se vuelve a abrir la llave de nivelación y esto produce un nuevo desnivel.

. **Paso 7:** se vuelve a cerrar la llave de nivelación y se procede a realizar nuevamente el Paso 5.

. **Paso 8:** se realizan los Pasos 6, 7 y 5, en ese orden, hasta que al abrir la llave de nivelación no se produzca más desnivel entre los sistemas.

. **Paso 9:** se mide la cantidad de agua que se retiró.

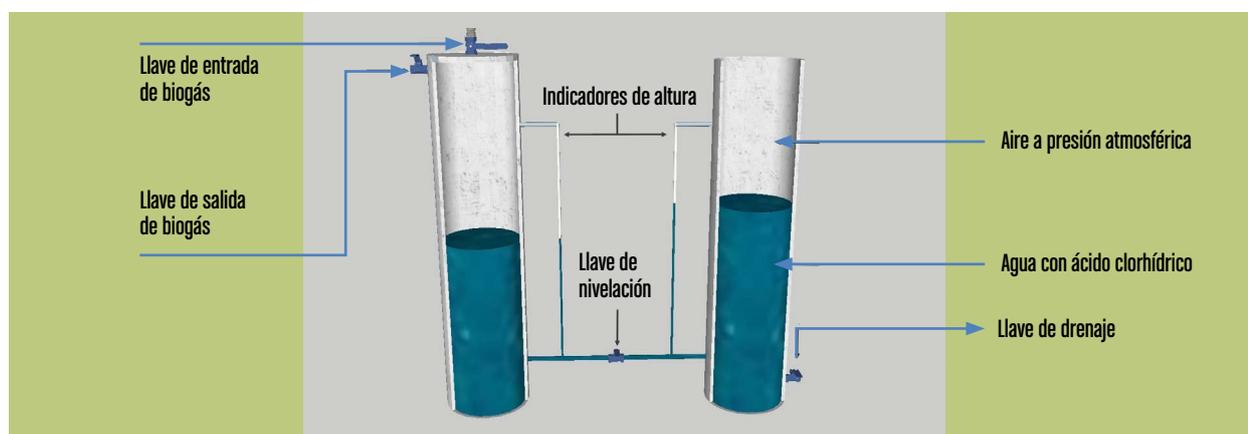
. **Paso 10:** se realizan por lo menos cinco mediciones iguales a las anteriormente descritas.

. **Paso 11:** teniendo los datos de cada medición de diferencia de altura y agua desplazada, se arma una curva para saber cuántos mililitros de agua son desplazados por cada centímetro que asciende el nivel (Menna *et al.*, 2007).

Una vez calibrado el equipo, solamente midiendo la diferencia de altura en nuestros ensayos, puede estimarse la cantidad de biogás que produce cada biodigestor en *batch*.

Para realizar las mediciones, los biodigestores en *batch* o botellas biodigestores se conectan a la torre cerrada por la entrada de biogás con la salida de biogás cerrada. Cuando se abre el biodigestor, el biogás ingresa a la torre generando un desplazamiento de agua, que se mide bajo la metodología anteriormente descrita. Finalmente, el biogás se retira del manómetro por la salida de biogás. El mismo se puede quemar directamente o almacenar para su estudio posterior.

Gráfico 15. Ilustración de manómetro para laboratorio



Fuente: Elaborado por los autores.

Para la preparación de los ensayos en *batch*, es necesario, al igual que en los procesos de fermentación, contar con un inóculo que sirva como fuente primaria de microorganismos, en este caso, metanogénicos. Existen varias fuentes potenciales de inóculo:

- El que puede obtenerse de biodigestores en funcionamiento.
- Estiércol de cerdos.
- Estiércol de rumiantes (vacas, ovejas, etc.).

Consideraciones:

- El uso de estiércol de animales, especialmente de rumiantes, es una de las formas más sencillas de obtener el inóculo, dado que se encuentra enriquecido en microorganismos anaeróbicos que se desarrollan naturalmente en el rumen. Estos microorganismos también son abundantes en el estiércol de cerdos, pese a que no son rumiantes, por lo que también puede ser utilizado como inóculo.
- Si lo que se quiere probar es el rendimiento de un tipo estiércol, puede utilizarse el inóculo como sustrato exclusivo de la biodigestión. En cambio, si se desea evaluar el comportamiento de otros compuestos, es necesario realizar ensayos con un porcentaje de inóculo y proporciones variables de los sustratos orgánicos elegidos.
- Generalmente, una proporción de inóculo necesaria para este tipo de ensayos oscila entre 20% y 50%. No es recomendable trabajar con porcentajes elevados de materia seca (MS) en la mezcla: niveles de 6-8% son más que útiles para realizar ensayos con buena producción de biogás.
- Debe recordarse que siempre hay que dejar al menos entre 20 y 40% de volumen del biodigestor en *batch* libre, como cámara de biogás.
- Si se trabaja con repeticiones, para realizar test estadísticos, es conveniente armar cada repetición de un tratamiento en un biodigestor

individualmente y no preparar una sola mezcla para varios biodigestores, ya que en la dosificación suelen cometerse errores.

Ejemplo de un ensayo de biogás al 8% de materia seca:

Datos de ensayo:

Muestra de estudio: 55% MS

Estiércol de vaca: 25% MS

Volumen del ensayo 1 kg

Inóculo 30% (300 g)

Muestra 70% (700 g)

Preparación del 30% del inóculo con un 8% de MS:

- Estiércol de vaca
 $300 \text{ g} \times 0,08$ (para que el ensayo tenga 8% de MS) = 24g MS de estiércol de vaca
 Son necesarios 24 g de MS de estiércol de vaca.
 Si el estiércol tiene un porcentaje de MS de 25%:
 $250 \text{ g} \text{-----} 1000 \text{ g}$
 $24 \text{ g} \text{-----} X = 96 \text{ g húmedos de estiércol de vaca}$

Se necesitan entonces 96 gramos de estiércol de vaca húmedo.

Preparación del 70% de la muestra:

- Muestra
 $700 \text{ g} \times 0,08 = 56 \text{ g MS}$
 Se necesitan 56 g de materia seca en la muestra. Si la misma tiene un porcentaje de MS de 55%:
 $550 \text{ g} \text{-----} 1000 \text{ g}$
 $56 \text{ g} \text{-----} X = 102 \text{ g húmedos de muestra}$
 Se necesitan entonces 102 gramos de estiércol de vaca húmedo.

Finalmente, se completa con agua para llegar a 1 kg, que es la unidad de biodigestión.

A partir de ensayos con estas características se pueden obtener en un corto plazo una gran cantidad de resultados y datos de gran valor, cuyo adecuado análisis permite:

- Saber si el proceso de biodigestión ocurre normalmente o si en el medio de la reacción hay algún tipo de inhibidor (antibióticos, metales pesados, etc.).
- Medir la cantidad potencial de biogás que puede producir un sustrato bajo condiciones determinadas (temperatura, porcentaje de materia seca, grado de mezclado, presión, etc.).
- Obtener la curva de producción de biogás en función del tiempo (como se muestra en la Figura 4).
- Medir las características físico-químicas tanto del inóculo y del sustrato, como también del digerido, para evaluar sus propiedades como fertilizante o enmienda orgánica.
- Estimar los tiempos de retención hidráulica óptimos para un sustrato en una temperatura determinada.

GUÍA TEÓRICO-PRÁCTICA
SOBRE EL BIOGÁS
Y LOS BIODIGESTORES

N° 12

COLECCIÓN DOCUMENTOS TÉCNICOS

Organización de las Naciones Unidas
para la Alimentación y la Agricultura (FAO)

www.fao.org

ISBN 978-92-5-131559-0



9 7 8 9 2 5 1 3 1 5 5 9 0

CA5082ES/1/07.19