



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA RESIDUOS AGRÍCOLAS

Lenin Núñez-Pintado

Piura, marzo de 2017

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica

Núñez, L. (2017). *Diseño e implementación de prototipos de digestión anaerobia para residuos agrícolas* (Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.

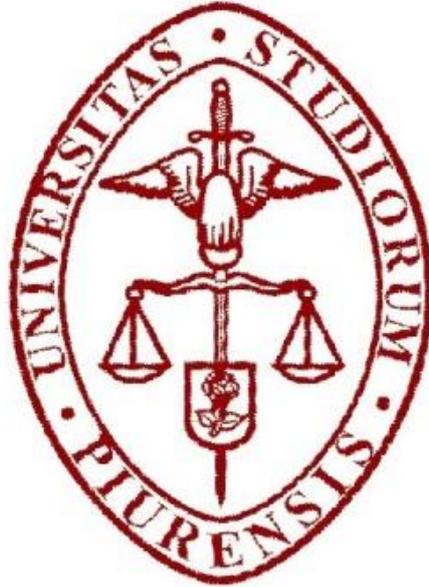


Esta obra está bajo una licencia

[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](https://repositorio.institucional.pirhua.edu.pe/)

UNIVERSIDAD DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERÍA



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA
PARA RESIDUOS AGRÍCOLAS**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

LENIN FRANCHESCOLETH NÚÑEZ PINTADO

Asesor: William Ipanaqué Alama

Piura, Marzo 2017

*A mis padres Leo y Fely, a mi novia Brenda y a los niños de mis comunidades de
Chuchuhuasi y Ciruelo, en Cajamarca.*

Prólogo

Los peruanos hemos sido beneficiados con la abundancia de recursos naturales. Estos recursos representan una gran oportunidad para nuestro desarrollo, pero a la vez nos dan la gran responsabilidad de su cuidado y de su preservación para que la sociedad humana siga existiendo en nuestro planeta.

En este contexto es sumamente importante para nuestro país una correcta gestión de las toneladas de residuos orgánicos que diariamente se generan. De acuerdo con un estudio de la FAO (ONU para la Alimentación y Agricultura) del año 2008, en el Perú se producen 16 millones de toneladas anuales de residuos orgánicos sólidos provenientes de agroindustrias, granjas y madereras. El Ministerio del Medio Ambiente, en un estudio del año 2012 indica que diariamente el Perú genera 2 millones de aguas residuales (sin contar las descargas informales en ríos, lagunas y el océano) de las cuales solamente el 32% son tratadas. Otro estudio de este mismo organismo del año 2016 señala que se generan 18 mil toneladas de residuos sólidos municipales y solamente el 48% es depositado en vertederos formales, el resto termina en botaderos informales.

Frente a esta realidad la tesis realizada tiene como objetivo estudiar el aprovechamiento de estos residuos orgánicos a través del proceso de digestión anaerobia. Esta tecnología, ampliamente desarrollada debido a sus beneficios energéticos y de salubridad social y ambiental ha sido ampliamente desarrollada a nivel doméstico e industrial en países desarrollados y en vías de desarrollo.

Gracias a esta tesis he aprendido que aún tenemos muchos por estudiar y aplicar en el área de tratamiento de residuos orgánicos en nuestro país. Y que un enorme potencial energético no aprovechado se está convirtiendo en un agente nocivo para el medio ambiente y la salud pública del Perú. Cabe resaltar lo gratificante que ha sido trabajar en grupos multidisciplinarios para el desarrollo de este estudio y ver como especialistas de áreas muy distintas trabajan en conjunto en busca de un objetivo en común: el desarrollo de tecnologías sustentables para la mejora de la calidad de vida de los demás.

Cabe mencionar lo importante que fueron las visitas realizadas a plantas para conocer experiencias de aplicación real de esta tecnología. Se visitaron la Planta de Biogás La Calera (Chincha), las plantas Ecodiseño y Servinor (Santiago, Chile).

Es impasable agradecer al Laboratorio de Sistemas Automáticos de Control de la Universidad de Piura, ya que sin su equipamiento, instalaciones y el asesoramiento de su equipo humano no habría sido posible la ejecución de este estudio. Le agradezco a la Red BioLAC, por el asesoramiento brindado por sus integrantes y por hacer posible las visitas técnicas en Santiago. También es especial el agradecimiento al Proyecto Fyncit PIAP-3-P-1054-14 de la Universidad de Piura y el Ministerio de la Producción del Perú, dentro del cual se ha desarrollado la presente tesis.

Resumen

En el presente trabajo se ha realizado el diseño e implementación de prototipos reactores de digestión anaerobia para el aprovechamiento de los abundantes residuos agrícolas del norte del Perú.

Se han implementado dos prototipos, el primero es una cámara para realizar ensayos de potencial bioquímico de metano. Mediante este ensayo podremos conocer cuáles son los residuos que producen una mayor cantidad de metano. El segundo es un prototipo de reactor anaerobio semicontinuo a escala de laboratorio que simula el funcionamiento continuo de un reactor de escala industrial. Aquí se tiene como objetivo monitorear los principales parámetros del proceso de digestión anaerobia para, en investigaciones futuras, controlar el proceso y maximizar la producción de metano. Debido a la producción creciente de cacao y banano orgánico en la región; son estos residuos los que se han elegido para el presente estudio.

Los prototipos implementados satisfacen las condiciones para la realización de los ensayos indicadas por las normas técnicas que se han seguido. Además dan un alcance de las mejoras que se tendrían que implementar a futuro. Mediante los ensayos realizados, se ha concluido que los residuos agrícolas presentan un alto potencial energético que actualmente no está siendo aprovechado.

Prólogo	
Resumen	
Índice	
Introducción.....	1
1 CAPÍTULO 1: ASPECTOS GENERALES.....	2
1.1 ¿QUÉ ES UN BIODIGESTOR?	3
1.1.1 Clasificación de los digestores anaerobios	4
1.1.2 Tecnologías particulares de biodigestores y reactores para digestión anaerobia.....	5
1.1.2.1 Biodigestor de laguna cubierta	5
1.1.2.2 Reactor continuo de tanque agitado	7
1.1.2.3 Reactor anaerobio de flujo ascendente.....	8
1.1.2.4 Reactor anaerobio de membrana	9
1.1.2.5 Biodigestor tubular	9
1.2 APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE.....	11
1.2.1 Propiedades químicas del biogás.....	11
1.2.2 Conversión energética del biogás	13
1.3 OBTENCIÓN DE ABONO ORGÁNICO	14
2 CAPÍTULO 2: PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	15
2.1 MATERIA PRIMA	16
2.1.1 Clasificación de la materia prima según su origen	16
2.1.1.1 Materia prima de origen agrícola	16
2.1.1.2 Materia prima de origen industrial	17
2.1.1.3 Materia prima de origen urbano	17
2.1.2 Parámetros importantes de la materia prima, análisis y medición	18
2.1.2.1 Nivel de pH.....	18
2.1.2.2 Materia seca (Dry Matter-DM)	18
2.1.2.3 Materia seca orgánica (Organic Dry Matter-ODM).....	19
2.1.2.4 Demanda Química de Oxígeno (Chemical Oxygen Demand-COD).....	19
2.1.2.5 Contenido de nitrógeno y de carbono total (Relación C/N).....	19
2.1.2.6 Potencial bioquímico de metano	20
2.1.3 Idoneidad, disponibilidad y digestibilidad de la materia prima.....	25
2.1.4 Impurezas e inhibidores en la materia prima	26
2.2 ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	26
2.2.1 Hidrólisis	27
2.2.2 Acidogénesis	28
2.2.3 Acetogénesis.....	28
2.2.4 Metanogénesis	28
2.3 PARÁMETROS DE MONITOREO DE PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA	29
2.3.1 Temperatura	29
2.3.2 Nivel de pH.....	30
2.3.3 Carga orgánica	31
2.3.4 Producción y calidad del biogás.....	32
2.3.5 Nitrógeno amoniacal	33
2.3.6 Ácido grasos volátiles (Volatile Fatty Acids - VFA).....	34
2.3.7 Relación de alcalinidad (FOS/TAC, VFA/TA, IA/PA, VFA/ALK o VFA/Bicarbonato)	35
2.3.8 Agitación.....	36
2.3.9 Tiempo de retención hidráulica (HRT)	37
2.3.10 Tasa de carga orgánica (Organic Load Rate - OLR).....	37

3	CAPÍTULO 3: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS	39
3.1	CÁMARA DE ENSAYOS DE POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (BMP)	40
3.1.1	<i>Descripción</i>	40
3.1.2	<i>Componentes</i>	41
3.1.2.1	Cámara temperada	41
3.1.2.2	Selección de <i>heater</i> para baño maría	42
3.1.2.3	Control de temperatura	43
3.1.2.4	Sistema de medición de biogás y metano.....	44
3.1.3	<i>Implementación</i>	47
3.2	REACTOR SEMICONTINUO DE TANQUE AGITADO	49
3.2.1	<i>Descripción de componentes</i>	49
3.2.1.1	Tanque de reactor	49
3.2.1.2	Sistema térmico	49
3.2.1.3	Sistema agitador	51
3.2.1.4	Sistema de ingreso/salida de sustrato y de salida de biogás	54
3.2.2	<i>Implementación</i>	56
4	CAPÍTULO 4: PARTE EXPERIMENTAL	57
4.1	ENSAYO DE POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (BMP)	58
4.1.1	<i>Biomasa o inóculo</i>	58
4.1.1.1	Concentración y proporción de inóculo.....	58
4.1.1.2	Sustrato o materia prima y proporciones	59
4.1.2	<i>Puesta en marcha</i>	60
4.2	REACTOR SEMICONTINUO.....	62
4.2.1	<i>Preparación de inóculo y sustrato</i>	62
4.2.2	<i>Puesta en marcha y operación</i>	63
4.2.3	<i>Monitoreo de parámetros</i>	64
4.2.3.1	Monitoreo de nivel de pH	64
4.2.3.2	Monitoreo de ratio de alcalinidad	66
4.2.3.3	Monitoreo de carga orgánica.....	68
4.2.3.4	Monitoreo de temperatura.....	69
4.2.3.5	Monitoreo de producción de biogás.....	69
5	CAPÍTULO 5: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	70
5.1	RESULTADOS DE ENSAYO BMP	71
5.1.1	<i>Producción de biogás</i>	71
5.1.2	<i>Potencial bioquímico de metano (BMP)</i>	75
5.1.3	<i>Concentración de metano</i>	78
5.2	PARÁMETROS DE REACTOR SEMICONTINUO	79
5.2.1	<i>Nivel de pH</i>	79
5.2.2	<i>Ratio de Alcalinidad</i>	80
	Conclusiones.....	80
	Bibliografía	
	Anexos	

Introducción

Actualmente la tecnología de los biodigestores ha crecido considerablemente a nivel mundial, teniendo una gran acogida en países africanos y asiáticos en los cuales están enfocados a solucionar problemas causados por la elevada producción de residuos orgánicos debido a la alta densidad demográfica y ganadera, deficiencias energéticas y/o económicas, por lo que mayormente su aplicación es a nivel doméstico y agrícola. En contraste tenemos las aplicaciones a gran escala llevadas a cabo en Europa, donde se emplean la última tecnología enfocándose en solucionar los problemas causados por la deposición final de elevados volúmenes de residuos orgánicos urbanos y agrícolas, así como también para solucionar problemas de índole energética dirigidos a reducir la tasa de consumo de combustibles fósiles. La generación eléctrica por biogás es una fuente de energía renovable que, en países como Alemania, ha llegado a 3312 MW de potencia eléctrica instalada, esto es el 30% de la potencia eléctrica total instalada en el Perú¹.

En las aplicaciones domésticas y de bajos volúmenes utilizadas en África y Asia, se ha observado que la mayor materia prima utilizada son las aguas residuales domésticas, desperdicios de cocina, estiércol humano y de ganado.

En nuestro país la aplicación de esta tecnología ha estado mayormente dirigida al nivel doméstico-rural, habiéndose instalado hasta el 2012 un total de 360 biodigestores domésticos, de los cuales casi la mayoría se encuentran actualmente en desuso, debido a la falta de interés por parte de los propietarios, poca capacitación y asistencia técnica; y al carácter asistencialista que tuvieron [1]. Sin embargo cabe resaltar las experiencias de carácter privado, como la Central Térmica de Huaycoloro (Callao) que genera, a partir de residuos urbanos, 4.8 MW de electricidad que vende al SEIN², el caso de la empresa avícola La Calera (Chincha) que produce 6600 m³/día de biogás a partir de estiércol de aves para satisfacer su demanda energética interna [2], así como también la empresa Industrias del Espino que genera 2 MW a partir de los aguas residuales de la industria de la palma aceitera en Tocache, San Martín.

¹ Federal Ministry of Economics and Technology. Biogas German Association.

² <http://www.petramas.com/proyecto-de-generacion-de-energia-electrica-a-partir-del-biogas/>.
<http://www.coes.org.pe/wcoes/coes/estadistica/EstadisticaDiaria.aspx>

Capítulo 1:
Aspectos Generales

1.1 ¿Qué es un biodigestor?

Estos sistemas son recipientes herméticamente sellados dentro de los cuales se introduce materia orgánica (estiércol, residuos domésticos, residuos agrícolas, etc.) en cierta dilución de agua. La materia orgánica (también llamada sustrato o materia prima) es degradada por microorganismos especiales (hongos y/o bacterias), los cuales están contenidos en la materia prima o pueden también ser inoculados en la dilución. El recipiente está configurado de tal modo que satisface las condiciones necesarias para que se lleve a cabo la actividad microbiana. La principal condición es la ausencia de oxígeno (ambiente anaeróbico), además se debe mantener ciertos rangos de temperatura, nivel de pH, agitación, flujo de materia orgánica, entre otros. Como productos de este proceso se obtiene biogás y abono, se eliminan los malos olores y se disminuye el potencial contaminante que tenía la materia orgánica antes del proceso. El biogás está compuesto generalmente en un 60% por metano, un gas combustible. El bioabono es la materia orgánica degradada a sus componentes químicos más sencillos.

Con un biodigestor se cierra el ciclo vital del biogás, y es una alternativa saludable para la protección del medio ambiente pues es una fuente de energía renovable producida a partir de recursos locales que pueden haber sido solamente un pasivo ambiental. Además disminuye el uso de combustibles fósiles, por lo que contribuye a contrarrestar el calentamiento global por efecto invernadero. Por otro lado, se obtiene como subproducto abono orgánico que devuelve al suelo los nutrientes tomados por los sembríos. Por todo esto un biodigestor se convierte también en una fuente de ingresos para los agricultores, sobre todo en las zonas rurales [3]. En la figura 1 se muestra el ciclo del biogás.

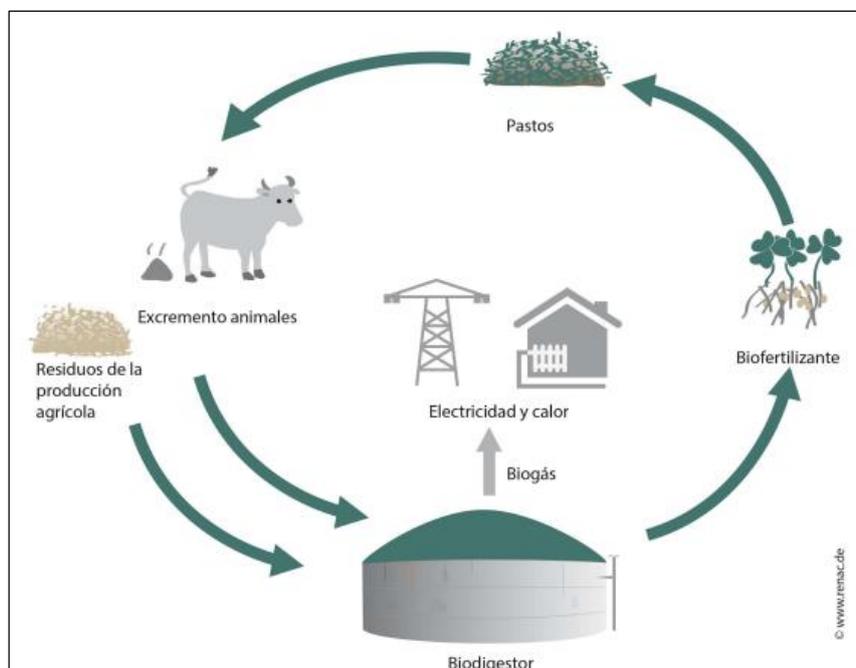


Figura 1. Ciclo del biogás de la materia orgánica.

Fuente: Tomado de [3].

1.1.1 Clasificación de los digestores anaerobios

Los sistemas de digestión anaeróbica se pueden clasificar como en la figura 2.

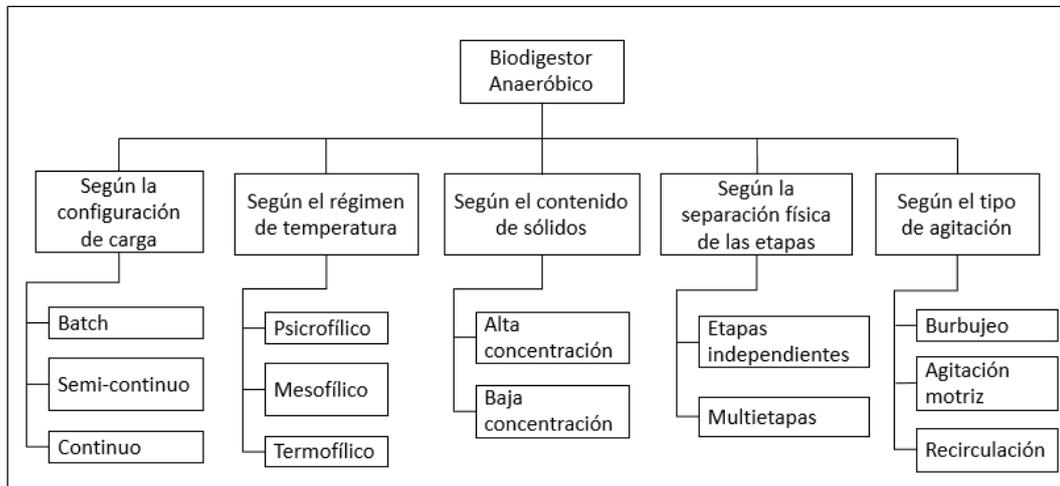


Figura 2. Clasificación de biodigestores anaerobios.

Fuente: Adaptado de [4].

Los biodigestores tipo batch (o por lotes) reciben un único ingreso de materia prima al inicio del proceso; cuando termina la producción de biogás ingresa la siguiente carga, y así sucesivamente. En el tipo continuo la materia prima va ingresando y saliendo continuamente en cantidades iguales durante todo el proceso de generación de biogás.

En el tipo semicontinuo, el biodigestor es alimentado inicialmente con una carga de materia prima, luego durante el proceso va ingresando materia prima de manera continua, pero en cantidades menores a la inicial.

El régimen de temperatura, depende de los microorganismos que realicen el proceso. En el rango psicrófilico los microorganismos trabajan a temperaturas entre 20°C y 25°C, en el rango mesofílico las temperaturas son entre 35°C y 45°C; y en el rango termofílico entre 75°C y 85°C [5].

Cuando la concentración de sólidos es menor a 20%, el proceso es de baja concentración y cuando comprende entre 20% y 50% la concentración es alta. A concentraciones mayores a 50%, los microorganismos serán inhibidos y el proceso no podrá llevarse a cabo [4].

El proceso de biodigestión puede llevarse a cabo en sendos recipientes independientes para cada etapa o en un único recipiente en el cual se producen todas las etapas del proceso.

La agitación por burbujeo consiste en inyectar el biogás ya producido desde el fondo del tanque con lo cual las burbujas de biogás subirán hasta la superficie del líquido agitando el contenido que encuentren a su paso. La agitación motriz sumerge un eje con una paleta en el líquido, el eje es accionado por un motor externo. La recirculación extrae la mezcla del líquido desde un cierto nivel del tanque y lo vuelve a introducir al tanque.

1.1.2 Tecnologías particulares de biodigestores y reactores para digestión anaerobia

Existen configuraciones particulares de reactores que han sido desarrolladas ya sea por investigadores o por industrias, o que simplemente son el fruto de la evolución de la tecnología de reactores. Se han elegido los reactores por ser los más usados o por tener una mayor proyección de utilización a futuro. También se presentarán algunas plantas operativas en nuestro país.

1.1.2.1 Biodigestor de laguna cubierta

Su costo de inversión es relativamente bajo, debido a su simple diseño constructivo, lo cual también implica una tasa de fallos significativamente menor que la de los sistemas complejos.

Preferentemente usados cuando se dispone de espacio suficiente o ya existe una laguna abierta. Para esta configuración los sustratos pueden contener menos del 2 a 3 % de sólidos, por ello se usan en campos de ganado porcino o vacuno, plantas de aceite de palma y destilerías de alcohol, como se ejemplifican en las figuras 3 y 4. Frecuentemente, en campos ganaderos porcinos o vacunos el abono se evacúa del granero varias veces al día usando efluentes de la laguna [6].



Figura 3. Biodigestores de laguna cubierta. Genera 2MW, usando como sustrato residuos de la industria de la palma aceitera en Tocache, Perú (Grupo Romero).

Fuente: Tomado de [7].



Figura 4. Biodigestor de laguna cubierta de 4500 m³ instalado en un establo ganadero en Trujillo, Perú.

Fuente: Tomado de [8].

En climas cálidos, estos sistemas operan a temperatura ambiente, lo que acarrea variaciones en la producción de biogás durante las estaciones y con ello la reducción de la eficiencia del proceso. En climas fríos, se puede proveer el calor requerido por el proceso con sistemas calefactores de poca tecnología a partir de una unidad combinada de calor y electricidad (*Combined Heat and Power, CHP*) [6].

El sustrato es almacenado en una laguna, donde el biogás es producido por digestión anaerobia. Una cubierta flotante, fabricada generalmente a base de geomembrana de alta densidad, sobre la laguna evita que el biogás generado sea liberado a la atmósfera.

1.1.2.2 Reactor continuo de tanque agitado

Más conocido como CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*), como su nombre lo dice es un reactor alimentado con sustrato de manera continua, para ello cuenta con bombas de sólidos o bombas hidráulicas dependiendo de la naturaleza del sustrato. En la figura 5 se muestra reactores de una avícola peruana.



Figura 5. Reactores de 750 m³ y 1500 m³ en avícola La Calera (Chincha, Perú). Producen entre 1500 y 2000 m³ de biogás/día a partir de estiércol aviar.

Fuente: Tomado de [2].

El reactor es un tanque cilíndrico, tiene un techo fijo, por tanto es en la cabecera del tanque donde se almacena inicialmente el biogás producido para luego ser conducido hasta un reservorio o ser tratado para su posterior utilización. En el fondo del tanque existen agitadores que permiten que el sustrato y los microorganismos anaerobios tengan una distribución uniforme, ver la figura 6.



Figura 6. Agitador y sistema de calefacción (en paredes) en reactor de 3000 m³ (en avícola La Calera). Produce aproximadamente 2500 m³ de biogás/día.

Fuente: Tomado de [2].

A diferencia de los reactores de laguna cubierta, es recomendado para sustratos con un alto contenido de sólidos suspendidos (3% a 6%), por lo que es más usado con residuos agrícolas. Su complejidad tecnológica es mayor, sin embargo se puede conseguir una mayor eficiencia en el proceso. El nivel de líquido es constante pues el volumen de sustrato que ingresa es igual al volumen de digestato que sale del reactor.

1.1.2.3 Reactor anaerobio de flujo ascendente

Llamado también UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), es un reactor longitudinal que opera de modo continuo. El agua residual que se desea tratar ingresa por la parte inferior del reactor y fluye con dirección ascendente a lo largo del reactor hasta salir por la parte superior.

Los microorganismos anaerobios forman gránulos los cuales se mantienen suspendidos en el líquido por acción combinada del flujo ascendente, la gravedad y floculantes añadidos. El flujo origina turbulencia interna que proporciona un mayor contacto entre los microorganismos la materia orgánica del agua residual a degradar.

Debido a la ausencia de una matriz de fijación, en este sistema se crea un medio selectivo en el cual solamente sobreviven y proliferan los microorganismos que son capaces de unirse a otros formando gránulos. Estos densos agregados no son susceptibles a relaves por tanto se puede dar un buen tratamiento de las aguas residuales incluso a altas tasas de carga orgánica. En la figura 7 se muestra un esquema de este reactor.

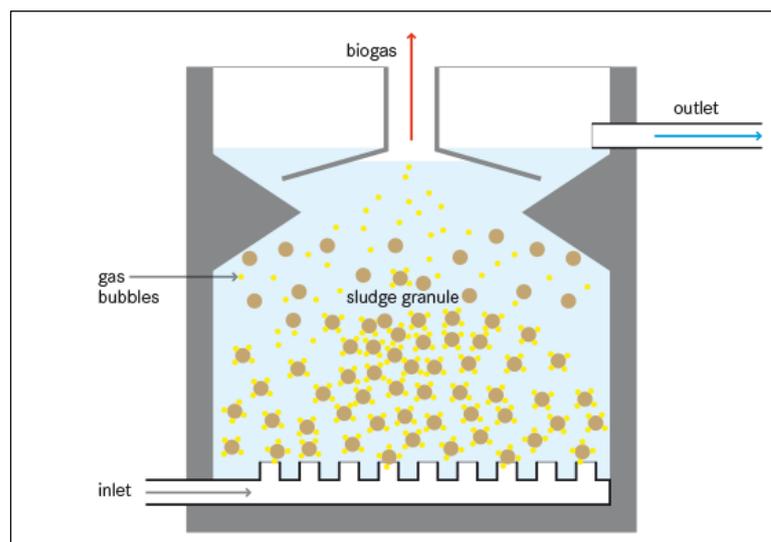


Figura 7. Reactor anaerobio de flujo ascendente

Fuente: Tomado de <http://www.sswm.info>

Este reactor recoge el biogás producido en una campana ubicada en la parte superior para luego ser aprovechado como energía por un consumidor externo o para suplir parte de la energía requerida por el mismo sistema.

1.1.2.4 Reactor anaerobio de membrana

El AnMBR (*Anaerobic Membrane Reactor*) integra una unidad de membrana dentro de un reactor externo al reactor principal. Esta membrana realiza la separación de los sólidos contenidos en el líquido, los cuales posteriormente son regresados al reactor principal, de esta manera se garantiza que no se pierdan los microorganismos y por lo tanto el proceso de digestión anaerobia se desarrolle más eficientemente [5]. En la figura 8 se esquematiza este tipo de reactor anaerobio.

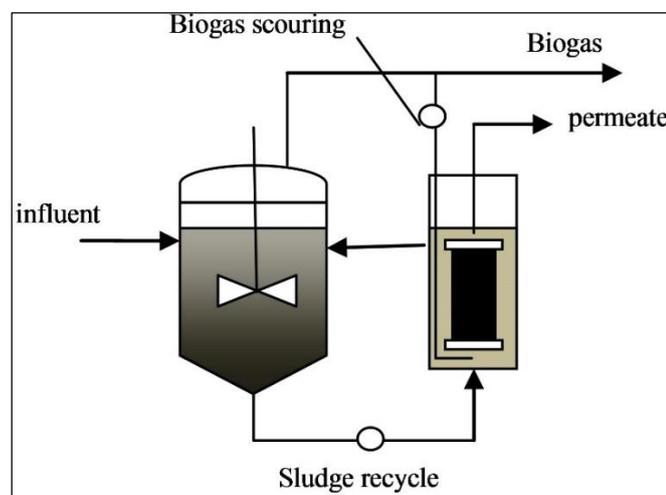


Figura 8. Esquema de reactor anaerobio de membrana
Fuente: Tomado de <http://file.scirp.org>

1.1.2.5 Biodigestor tubular

Este reactor es la más difundida en aplicaciones domésticas debido a su economía, fácil instalación y operación. Prácticamente no necesita monitoreo. Aunque su eficiencia es muy baja es una rápida solución a problemas como inadecuada gestión de residuos y salubridad. En la figura 9 se aprecia un esquema de este biodigestor.



Figura 9. Biodigestor tubular
Fuente: Tomado de <https://bioreactorrcr.wordpress.com/>

En el Perú ha sido la tecnología de digestión anaerobia que más se ha difundido, promovido por programas del Estado y ONGs. Hasta el 2012 se calculaba que existían alrededor de 360 biodigestores tipo tubular instalados en el país, sin embargo casi todos se encuentran actualmente inoperativos [9].

Cabe mencionar que la inclusión de tecnología de bajo coste y algunas modificaciones técnicas y de gestión de este tipo de biodigestores podría aumentar su eficiencia considerablemente. Por ejemplo la instalación de un invernadero mantiene la temperatura del reactor por encima de la temperatura ambiente y evita cambios bruscos de temperatura lo cual mejora la performance del proceso, ver figura 10.



Figura 10. Aumento y estabilización de temperatura de biodigestor mediante efecto invernadero en granja vacuna en Santiago de Chile.

Fuente: Elaboración propia.

Es también importante la gestión de estas tecnologías. Por ejemplo si la adecuada gestión de los desechos agrícolas mediante la operación de un biodigestor tubular, le da certificaciones a los productos de una asociación de productores agrícolas, entonces se crea un mayor interés por parte de los usuarios en el buen funcionamiento del biodigestor tubular.



Figura 11. Biodigestores tubulares instalados en Asociación de Productores de Banano Orgánico en Ecuador

Fuente: Cortesía de Biodigestores Ecuador Inc.

1.2 Aprovechamiento del biogás como combustible

1.2.1 Propiedades químicas del biogás

El biogás es una mezcla de gases compuesto principalmente por metano, el cual es el componente energético. Los procesos y sistemas de optimización y mejora de la digestión anaeróbica están orientados a aumentar cada vez más la concentración de este componente.

La composición química del biogás varía dependiendo de la materia prima, de las tecnologías que se han usado y de las condiciones en las que se ha llevado a cabo el proceso. En la tabla 1 se muestra la composición para el biogás generado en cuatro tipos de plantas: la primera de residuos agrícolas, la segunda de residuos orgánicos urbanos, la tercera a partir de vertederos urbanos, y la última a partir de aguas plantas de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 1. Composición química del biogás

Parameter	Farm-scale AD plant	Centralised AD plant	Landfill	Sewage treatment plant	Natural gas
CH ₄ (vol %)	55–60	60–70	35–65	60–65	81–89
Other hydrocarbons (vol %)	0	0	0	0	3.5–9.4
H ₂ (vol %)	0	0	0–3	0	—
CO ₂ (vol %)	35–40	30–40	25–45	35–40	0.67–1.00
N ₂ (vol %)	<1–2	2–6	<1–17	<1–2	0.28–14.00
O ₂ (vol %)	<1	0.5–1.6	<1–3	<0.05–0.70	0
H ₂ S (ppm)	25–30	0–2000	30–500	<0.5–6800	0–2.9
NH ₃ (ppm)	≈100	≈100	≈5	<1–7	0
Halogenated compounds (mg/m ³)	<0.01	<0.25	0.3–225	0–2	—
Siloxanes (mg/m ³)	<0.03–<0.2	<0.08–<0.5	<0.3–36	<1–400	—
Wobbe index	24–33	24–33	20–25	25–30	44–55
Lower heating value (MJ/Nm ³)	19.7–21.5	21.5–25.1	10.7–23.3	21.5–23.3	31–40

Note: 1 kWh/Nm³ = 3.6 MJ/Nm³.
Source: adapted with permission from Rasi *et al.* (2007); and Petersson and Wellinger (2009).

Fuente: Tomada de [10].

El sulfuro de hidrógeno es un compuesto tóxico, el cual debe ser filtrado antes de utilizar el biogás como combustible, de igual modo se debe remover el vapor de agua. En aplicaciones industriales el biogás antes de ingresar al motogenerador es sometido a un proceso de acondicionamiento en el cual es filtrado. En la tabla 2 se resumen las impurezas del biogás y los efectos adversos de cada uno.

Tabla 2. Efectos adversos de las impurezas del biogás

Component	Content	Effect
CO ₂	25–50% by vol.	<ul style="list-style-type: none"> - Lowers the calorific value - Increases the methane number and the anti-knock properties of engines - Causes corrosion (low concentrated carbon acid). if the gas is wet - Damages alkali fuel cells
H ₂ S	0–0.5% by vol.	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosive effect in equipment and piping systems (stress corrosion); many manufacturers of engines therefore set an upper limit of 0.05 by vol.%; - SO₂ emissions after burners or H₂S emissions with imperfect combustion – upper limit 0.1 by vol.% - Spoils catalysts
NH ₃	0–0.05% by vol.	<ul style="list-style-type: none"> - NO_x emissions after burners damage fuel cells - Increases the anti-knock properties of engines
Water vapour	1–5% by vol.	<ul style="list-style-type: none"> - Causes corrosion of equipment and piping systems - Condensates damage instruments and plants - Risk of freezing of piping systems and nozzles
Dust	>5 μm	<ul style="list-style-type: none"> - Blocks nozzles and fuel cells
N ₂	0–5% by vol.	<ul style="list-style-type: none"> - Lowers the calorific value - Increases the anti-knock properties of engines
Siloxanes	0–50 mgm ⁻³	<ul style="list-style-type: none"> - Act like an abrasive and damages engines

Fuente: Tomado de [11]

Otras características importantes del biogás se resumen en la tabla 3, se usa como referencia un biogás con la composición de metano entre 55 – 70% y de dióxido de carbono en 30 – 45%.

Tabla 3. Características del biogás.

Composition	55–70% methane (CH₄) 30–45% carbon dioxide (CO₂) Traces of other gases
Energy content	6.0–6.5 kWh m ⁻³
Fuel equivalent	0.60–0.65 L oil/m ³ biogas
Explosion limits	6–12% biogas in air
Ignition temperature	650–750 °C (with the above-mentioned methane content)
Critical pressure	75–89 bar
Critical temperature	–82.5 °C
Normal density	1.2 kg m ⁻³
Smell	Bad eggs (the smell of desulfurized biogas is hardly noticeable)
Molar Mass	16.043 kg kmol ⁻¹

Fuente: Tomado de [11]

1.2.2 Conversión energética del biogás

El biogás tiene tres productos finales de uso comercial: calor, electricidad y biometano. En la figura 12 podemos resumir la conversión energética del biogás.

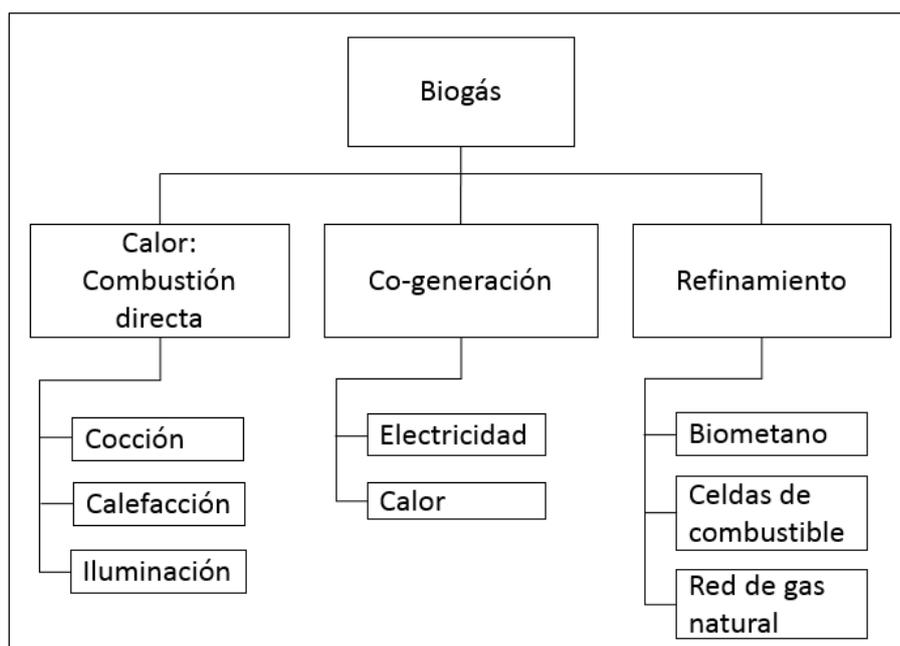


Figura 12. Conversión energética del biogás
Fuente: Elaboración propia

La combustión directa es usada en cocinas, calderas, calefacción e iluminación. Algunas compañías queman el biogás sólo para obtener bonos de carbono como utilidades.

Para la co-generación el biogás pasa por un proceso de purificación en el que se elimina el sulfuro de hidrógeno, posteriormente el proceso de combustión se da en motores de combustión interna, la co-generación se da en motores de combustión interna y en microturbinas. Además de electricidad en esta vía se produce calor, el cual puede ser destinado para algún proceso industrial o para calentar el mismo biodigestor.

Tras el refinamiento se obtiene metano, el que puede ser usado como combustible en vehículos. También puede ser inyectado a la red urbana de gas natural. Los últimos avances tecnológicos en países como Alemania están destinando el biogás, mediante un proceso de reformado, a su utilización en celdas de combustible de hidrógeno para la producción de electricidad y agua.

1.3 Obtención de abono orgánico

Además del biogás, mediante la digestión anaeróbica se obtiene bioabono, tanto en fase líquida como en fase sólida. Este abono es orgánico y reemplaza a los fertilizantes sintéticos, de esta manera se regresa a la tierra los nutrientes tomados por las plantas. La ventaja del bioabono, con respecto a la aplicación directa de los residuos vegetales o estiércol en los sembríos, es que el primero ya se encuentra degradado, por tanto los nutrientes pueden ser asimilados más rápidamente por el suelo y las plantas.

Capítulo 2:
Proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás

2.1 Materia prima

El proceso de digestión anaerobia utiliza materia proveniente de organismos vivos, es decir materia orgánica.

Aunque mediáticamente la producción de biogás está mayormente asociada a la utilización de estiércol de ganado, las materias primas empleadas son muy diversas. Cabe mencionar que es a través de la codigestión de materias primas diferentes que se logra una mayor producción de biogás.

2.1.1 Clasificación de la materia prima según su origen

2.1.1.1 Materia prima de origen agrícola

Puede ser estiércol de ganado o aguas de lavado de criaderos, restos vegetales de poda o de cosecha, así como también cultivos energéticos.

El estiércol puede ser de cerdos, caballos, aves de corral, etc. Dependiendo de la fuente animal y de la alimentación del ganado varía la producción de biogás de cada tipo de estiércol animal.

El estiércol, aparte de ser barato, tiene la ventaja de poseer una relación carbono-nitrógeno (C/N) alrededor de 25:1 lo que favorece al proceso de digestión anaerobia y además posee nutrientes para el desarrollo de microorganismos anaerobios. La desventaja es su baja composición en materia orgánica seca (entre 3% y 6%), esto da lugar a una baja producción de metano por unidad de estiércol digerido, entre 10m³ a 20m³ de metano por metro cúbico de estiércol digerido.

A pesar de esto es una buena opción como materia prima pues es abundante, y aún no está siendo aprovechado en todo su potencial, pues hay zonas ganaderas en países en vías de desarrollo como el Perú, donde no se produce biogás a partir del estiércol de ganado.

Los restos de podas y cosechas también pueden ser utilizados como materia prima, pues su composición puede ser rica en carbohidratos, grasas y proteínas necesarias para la digestión anaerobia. Estos residuos generalmente se someten a codigestión con residuos de estiércol, pues los nutrientes ausentes en el estiércol son aportados por los residuos vegetales. El biogás generado puede ser utilizado para satisfacer la demanda energética de sistemas de riego, alumbrado, refrigeración, cadenas de valor agregado, etc. Además el digestato se utiliza como fertilizante para los mismos sembríos. Su desventaja radica en que normalmente necesitan pretratamientos antes de ser sometidos a la digestión anaerobia pues son más difíciles de degradar, debido muchas veces, a su composición lignocelulósica.

Los cultivos energéticos son vegetales sembrados con el único objetivo de ser utilizados como materia prima para la producción de energía. Entre ellos el más usado en la generación de biogás es el maíz, aunque también destacan cereales, hierbas, remolacha, papa, girasol, etc. El empleo de estos cultivos implica preprocesos como cosecha, almacenamiento y pretratamiento.

2.1.1.2 Materia prima de origen industrial

Abarcan residuos de comida y bebidas, del procesamiento de pescado, industrial de lácteos, azúcar, biocombustibles, mataderos de animales, etc. Tiene como ventaja que en su mayoría son de composición homogénea y están focalizados, además son fácilmente digestibles y son ricos en grasas, proteínas y lípidos.

La generación de biogás a partir de residuos industriales es una buena alternativa para la industria, pues la energía producida satisface parte de la demanda energética de los procesos y además elimina los costos por la deposición final de los residuos contaminantes con lo que se contribuye a la política de protección ambiental de la empresa y se previene pasivos ambientales.

Esta categoría también abarca los efluentes de las plantas de biocombustibles. Estos efluentes debido a su alto contenido de grasas tienen un potencial elevado para la producción de biogás. La digestión anaerobia se puede aprovechar por ejemplo en las plantas de biodiesel, donde el contenido de glicerol es muy considerable y propicio para la digestión anaerobio, del mismo modo en la industria del bioetanol, las vinazas son un sustrato adecuado para la producción de biogás.

2.1.1.3 Materia prima de origen urbano

En esta categoría se considera a los residuos sólidos y las aguas servidas.

Los residuos domésticos como restos de comida, restos de jardín, entre otros, contienen materia orgánica la cual sirve como materia prima para la digestión anaerobia. Los costos de la utilización de esta materia prima se reducen cuando los residuos son segregados por los usuarios en sus mismas casas antes de ser entregados a los servicios de recolección. Los residuos domésticos poseen alta biodegradabilidad y alto potencial de producción de metano.

La digestión anaerobia es un proceso que actualmente se utiliza en las plantas modernas de tratamiento de aguas residuales para tratar los lodos primarios y secundarios provenientes del tratamiento aeróbico. Las aguas residuales tienen un potencial de metano similar al del estiércol de ganado o aguas de lavado de criaderos.

2.1.2 Parámetros importantes de la materia prima, análisis y medición

En todo proceso industrial es imprescindible conocer la materia prima para entender de qué manera va a afectar o beneficiar a nuestro proceso. Para esto existen algunos parámetros que nos dan ciertas características de la composición química de la materia prima con lo cual se puede predecir de alguna manera el desarrollo del proceso de digestión anaerobia, inhibición, producción y composición del biogás y el digestato.

2.1.2.1 Nivel de pH

El nivel de pH determina el nivel de acidez o basicidad de una solución acuosa. Cuando la materia prima es sólida la medición se realiza mediante la mezcla previa con agua destilada. Debido a la capacidad buffer del digestato en digestión anaerobia, las materias primas pueden tener un amplio rango de niveles de pH. El digestato en el reactor tiene que poseer un nivel de pH alrededor de 7. Pero si debido a la adición de materia prima en el reactor, el nivel de pH del digestato se afecta tanto que sale del rango permisible (6.8 ~ 7.5), entonces es necesario tratar previamente a la materia prima para neutralizar su pH. Si no se pudiese dar el pretratamiento y se produjese una acidificación, entonces se debe corregir el pH de manera artificial, adicionando una base al digestato en el reactor.

2.1.2.2 Materia seca (*Dry Matter-DM*)

La materia prima, antes de ser utilizada en el proceso, se le conoce como materia fresca (FM por sus siglas en inglés). Cuando a la FM se le quita el contenido de agua, entonces nos queda la materia seca. Es el porcentaje de materia orgánica e inorgánica que contiene la materia prima luego que se le ha quitado el agua. La medición se realiza mediante ensayos gravimétricos. Cuando la materia prima tiene un alto contenido de materia seca (mayor al 15%), es necesario un pretratamiento de dilución para evitar problemas en el mezclado y bombeo de la materia prima. Además un alto contenido de materia seca entorpece la movilidad de las bacterias metanogénicas en el digestato, lo que afecta a la eficiencia del proceso de digestión anaerobia. En cambio si el contenido de materia seca es muy bajo (menor al 2%), entonces el volumen del reactor tendrá que ser mayor pues la concentración de nutrientes es menor. Esto es una desventaja desde el punto de vista económico.

2.1.2.3 Materia seca orgánica (*Organic Dry Matter-ODM*)

Cuando a la materia seca se le quita todo lo inorgánico (minerales, cenizas, etc.), entonces lo que queda es la materia seca orgánica. Es la materia que en teoría será totalmente convertida en biogás. Su medición nos da una idea sobre la biodegradabilidad de la materia prima. Su medición también se realiza mediante ensayo gravimétrico, podemos referirnos a la norma EN 12 789. El ensayo consiste en secar la materia prima en una estufa a 103 °C para obtener la cantidad de materia seca, y luego secarla en una mufla a una temperatura de 500 °C hasta una masa constante. Si bien es cierto que la medición de la ODM nos da una idea de la biodegradabilidad de la materia prima, esto no es tan preciso, pues algunas sustancias orgánicas podrían volatizarse a temperaturas de 103 °C. No es válido expresar la producción específica de biogás con respecto a la masa de materia prima fresca, pues esto varía dependiendo del contenido de agua y material inorgánico. Es por esto que la producción específica es referida a la materia seca orgánica (por ejemplo $\text{litros}_{\text{biogas}}/\text{kg}_{\text{ODM}}$), pues es sólo ésta la que en teoría se convertirá en biogás.

2.1.2.4 Demanda Química de Oxígeno (*Chemical Oxigen Demand-COD*)

Este parámetro indica el total de materia químicamente oxidable, es decir la máxima energía química contenida en la materia prima. Es esta energía química que será convertida en biogás por los microorganismos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que a esta energía química total se le tiene que sustraer la energía utilizada por los microorganismos para su propia existencia y la energía química que queda contenida en la materia prima que no es degradable por los microorganismos. Este análisis es realizado siguiendo las normas técnicas DIN38 414(S9) o la norma APHA 5220 B. Su ventaja es que los compuestos volátiles a bajas temperaturas también son incluidos en la medición.

2.1.2.5 Contenido de nitrógeno y de carbono total (Relación C/N)

El nitrógeno es necesario para la formación de nuevos microorganismos anaeróbicos, mientras el carbono es su fuente de abastecimiento de energía. Los microorganismos anaeróbicos consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por tanto la relación entre estos elementos debe ser de 30:1 hasta 20:1.

El contenido de nitrógeno se determina mediante el análisis de nitrógeno total de Kjeldahl siguiendo la norma ISO 5663. Durante el proceso de digestión anaerobia entre el 60 – 80% del nitrógeno contenido en la materia prima será convertido en amoníaco. Si bien es cierto, el nitrógeno es necesario, el exceso de amoníaco en el reactor podría producir inhibición. Por esto es mejor conocer de antemano la cantidad de nitrógeno presente en la materia prima para tener los cuidados necesarios. Las materias primas con alto contenido de nitrógeno son aquellas que son ricas en proteínas como por ejemplo residuos de mataderos, vinaza y residuos de procesamiento de carne.

Cabe señalar que no todo el carbono indicado por el análisis de carbono total será aprovechado por los microorganismos, pues si el carbono está presente en materia prima no biodegradable, entonces no será accesible a los microorganismos. Los materiales con alto contenido de carbono (mayor a 35:1), es decir un bajo contenido de nitrógeno, sufren una descomposición y conversión a metano más lenta. Esto porque los microorganismos no tienen la energía necesaria para multiplicarse, por tanto habrá un menor número de microorganismos por cantidad de materia prima.

2.1.2.6 Potencial bioquímico de metano

Conocido como ensayo BMP (*Biochemical Methane Potential*) es quizás el más importante y es el que nos dará una idea real acerca de la producción de metano, así como también de la biodegradabilidad de la materia prima y su inhibición al proceso de digestión anaerobia. En este ensayo se somete a la materia prima a un proceso batch de digestión anaerobia en condiciones controladas de temperatura. Este proceso dura aproximadamente 30 días. Es detenido cuando la producción de metano es menor al 1% del metano producido. Antes y después del ensayo se debe medir el nivel de pH para determinar si se ha producido alguna acidificación. Los volúmenes de los reactores por lo general son de 0.5 a 1 litro. Las normas técnicas utilizadas para realizar este ensayo son las VDI 4630 y la DIN 38414 (S8).

Existen equipos comerciales para la realización de este ensayo de suma importancia como por ejemplo los de las compañías *Bioprocess Control Ltda* y *Anaero Technology Ltda*, de las figuras 4 y 5 respectivamente. Sin embargo es posible implementar un banco de pruebas para medir el BMP de las distintas materias primas que tengamos disponibles.

Es debido a la importancia de este análisis y al costo de los equipos comerciales que en esta tesis se propone la implementación de un prototipo de ensayos BMP de bajo costo, pero que a la vez cumpla con los requisitos y normas para que los datos obtenidos sean fiables. Más adelante se explicará a más detalle el procedimiento para la realización de este ensayo.

Cabe mencionar que el ensayo BMP nos determina el potencial de producción de metano bajo las condiciones de un ensayo batch. Si se pretende usar la materia prima en un proceso industrial o de mayor escala, es necesario implementar un prototipo continuo o semicontinuo (de 10 a 20 litros) para comprobar cómo se comporta el proceso de digestión anaerobia ante el ingreso semicontinuo de materia prima fresca y si es que esto produce alguna inhibición, afecta o mejora la producción de metano. Esta es la razón por la cual también se implementará un prototipo semicontinuo de digestión anaerobia, el cual se detallará más adelante.



Figura 13. Equipo AMPTS II para ensayo BMP de la firma Bioprocess Control
Fuente: Tomado de www.bioprocesscontrol.com

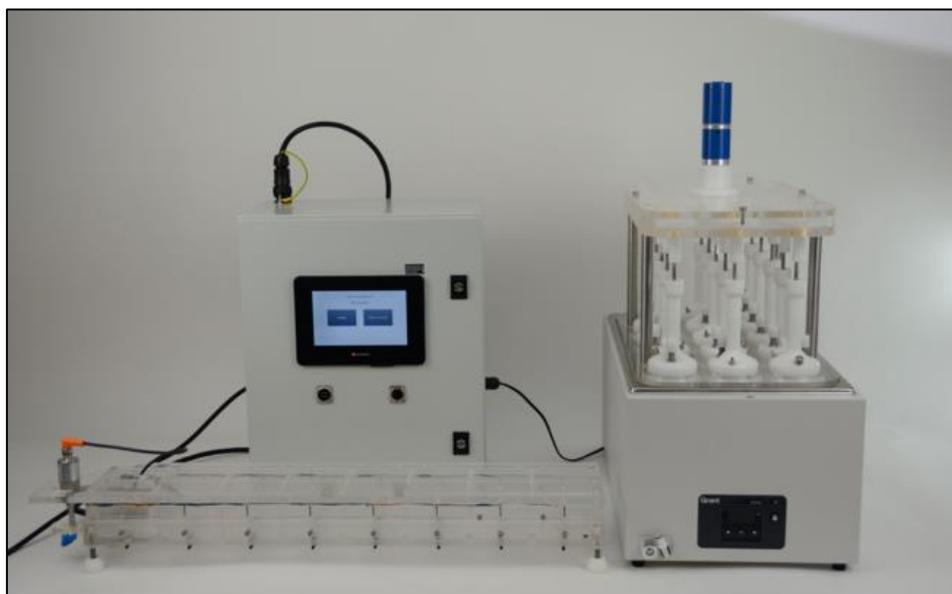


Figura 14. Equipo *Biomethane Potential Test Set* para ensayo del mismo nombre.
Fuente: Tomado de <http://www.anaero.co.uk/>

De acuerdo con [12], la forma de la curva de producción acumulada de biogás es un indicador de cómo se ha llevado a cabo el proceso de digestión anaerobia. En la figura 15, se aprecian las gráficas de producción acumulada que se podrían obtener en un ensayo BMP.

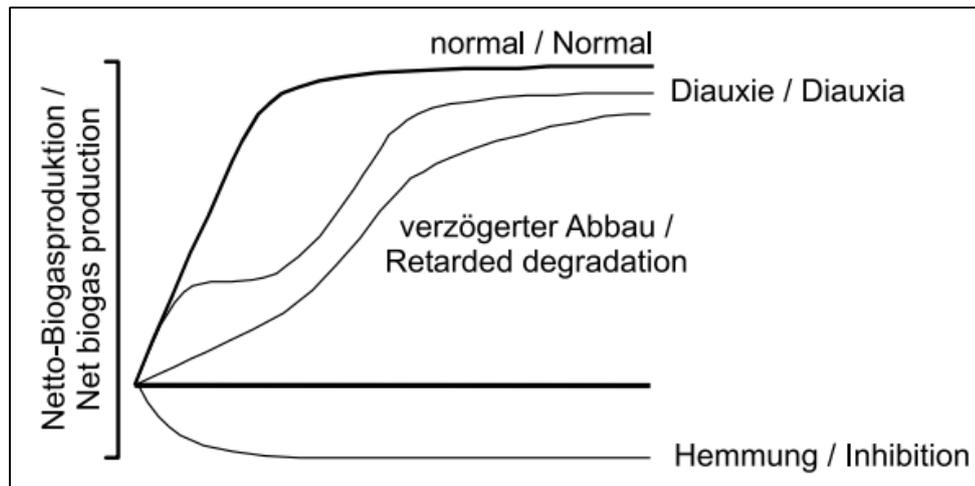


Figura 15. Formas de la producción acumulada de gas en ensayo BMP
Fuente: Tomado de [12].

Potencial bioquímico de metano mediante espectrometría de materia prima

Un ensayo BMP demora 30 días aproximadamente de acuerdo a norma. Esto requiere de tiempo para la obtención de resultados, así como la necesidad de operación del sistema, por tanto involucra costos. Actualmente se han desarrollado otras técnicas para medir el potencial de producción de metano de las materias primas. Una de las técnicas más exitosas es la del BMP Flash®, desarrollada por *Véolia Environnement Recherche & Innovation, INRA-Environmental Biotechnology Laboratory, Irstea y Écoles des Mines d'Alès*. Utiliza la espectroscopia del infrarrojo cercano (1000nm – 2500 nm del rango espectral) para detectar la composición de la materia orgánica. Luego mediante un modelo desarrollado con mínimos cuadrados parciales se estima el BMP para la materia prima en estudio [13] [14]. Ver la figura 16.

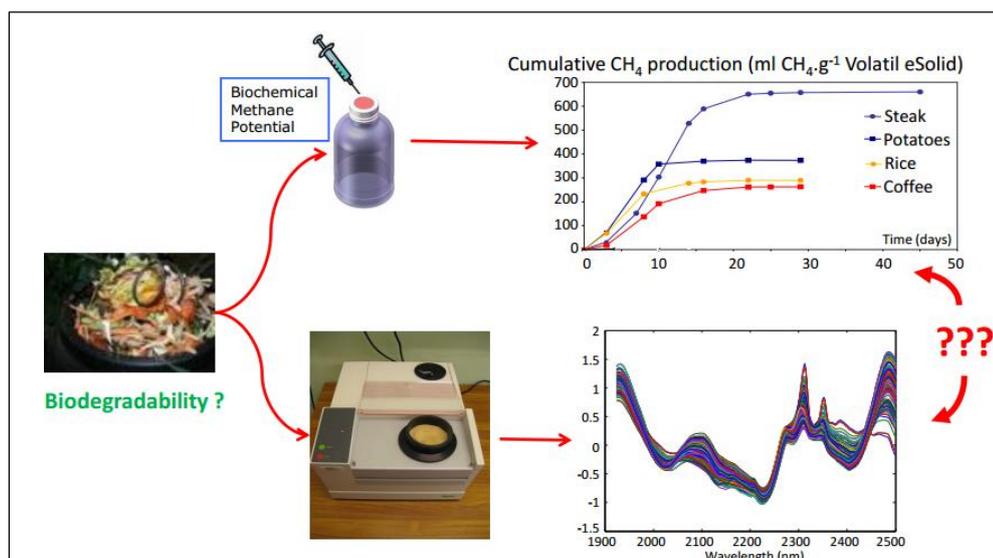


Figura 16: Método BMP Flash® para la medición del potencial de metano de materia orgánica.

Fuente: Tomado de [15]

En la tabla 4 se muestra un resumen de los principales parámetros de caracterización de la materia prima y sus respectivos estándares.

Tabla 4. Normas técnicas para caracterización de materias primas

Analysis	Standard ⁽¹⁾	Title
pH value	EN 12 176	Characterization of sludge – Determination of pH value
	APHA 4500-H ⁺ B	pH value “Electrometric method”
Total solids (TS) / Dry matter (DM)	EN 12 880	Characterization of sludges – Determination of dry residue and water content
	APHA 2540 B	Total solids dried at 103–105°C
Volatile solids (VS) / Organic dry matter (oDM)	EN 12 879	Characterization of sludges – Determination of the loss on ignition of dry mass
	APHA 2540 E	Fixed and volatile solids ignited at 550°C
Chemical oxygen demand (COD)	DIN 38 414 (S9)	German standard methods for the examination of water, wastewater and sludge – Sludge and sediments (group S) – Determination of the chemical oxygen demand (COD) (S9)
	APHA 5220 B	Chemical oxygen demand (COD) “Open reflux method”
Total Kjeldahl nitrogen (TKN)	ISO 5663	Water quality – Determination of Kjeldahl nitrogen – Method after mineralisation with selenium
	ISO 11261	Soil quality – Determination of total nitrogen – Modified Kjeldahl method
	APHA 4500-N _{org} B	Nitrogen (organic) “Macro-Kjeldahl method”
Biochemical methane potential / Biomethane potential (BMP)	EN 11734	Water Quality – Evaluation of the “ultimate” anaerobic degradability of organic compounds in digested sludge – Method by measurement of the biogas production
	DIN 38414 (S8)	German standard methods for the examination of water, wastewater and sludge – Sludge and sediments (group S) – Determination of the amenability to anaerobic digestion (S8)
	VDI 4630	Fermentation of organic materials – Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests

Fuente: Tomada de [13].

Los parámetros característicos de la materia prima determinan su eficiencia en el proceso de digestión anaerobia. La tabla 5 muestra una lista de varios tipos de materias prima con sus principales parámetros característicos.

Tabla 5: Parámetros característicos de algunas materias primas para digestión anaerobia

Type of feedstock	Organic content	C:N ratio	DM ^a (%)	VS ^b % of DM	VS (%)	Methane yield (m ³ CH ₄ /kg VS)	Methane production (m ³ CH ₄ /m ³)
Animal wastes and by-products							
Pig slurry	Carbohydrates, proteins, lipids	7	5	80.0	4.0	0.30	12.0
Pig manure, solid	Carbohydrates, proteins, lipids		20	80.0	16.0	0.30	48.0
Cattle slurry	Carbohydrates, proteins, lipids	13	8	80.0	6.4	0.20	12.8
Cattle manure, solid	Carbohydrates, proteins, lipids		20	80.0	16.0	0.2	32.0
Poultry droppings	Carbohydrates, proteins, lipids	7	5	80.0	4.0	0.30	12.6
Poultry manure, solid	Carbohydrates, proteins, lipids		20	80.0	16.0	0.30	48.0
Stomach/intestine content, cattle	Carbohydrates, proteins, lipids	4	12	80	9.6	0.40	38.4
Stomach/intestinal content, pig	Carbohydrates, proteins, lipids	4	12	80	9.6	0.46	44.2
Plant wastes and by-products							
Straw	Carbohydrates, lipids	90	70–90	80–90		0.15–0.35	
Garden wastes	Carbohydrates, lipids	125	60–70	90		0.20–0.50	
Grass	Carbohydrates, lipids	18	20–25	90		0.30–55	
Fruit wastes	Carbohydrates, lipids	35	15–20	75		0.25–0.50	
Organic wastes from industries							
Whey	75–80% lactose, 20–25% protein	—	5	90	4.5	0.33	15.0
Concentrated whey	75–80% lactose, 20–25% protein	—	10	90	9.0	0.54	31.5
Flotation sludge	65–70% proteins, 30–35% lipids	—	5	80	4.0	0.54	21.6
Fermentation slop	Carbohydrates	7	1–5	90		0.35–0.78	
Whole silage (grain)			12.6	91	11.5	0.47	53.9
Thin silage (grain)			8.5	86	7.3	0.50	36.5
*Fish oil	30–50% lipids	—	90	90	81.0	0.80	648.0
*Soya oil/margarine	90% vegetable oil	—	95	90	85.5	0.80	684.0
*Alcohol	40% alcohol	—	40	95	38.0	0.40	152.0
*Bleach clay			98	40	39.2	0.8	313.6
Olive pulp		—	24	96	23	0.18	41.4
Brewers spent grains		—	20	90	18	0.33	59.4
*Glycerine							

Tabla 5. Parámetros característicos de algunas materias primas para digestión anaerobia (Continuación)

Type of feedstock	Organic content	C:N ratio	DM ^a (%)	VS ^b % of DM	VS (%)	Methane yield (m ³ CH ₄ /kg VS)	Methane production (m ³ CH ₄ /m ³)
Energy crops							
Grass silage		17	15–40	90		<0.45	
Maize silage							
Fodder beet silage							
Sewage sludge							
Waste water sludge			5	75	3.75	0.4	15.0
Conc. wastewater sludge			10	75	7.5	0.4	30.0
Food remains			10	80		0.5–0.60	

^a Dry matter.
^b Volatile solids.

Fuente: Tomada de [10]

2.1.3 Idoneidad, disponibilidad y digestibilidad de la materia prima

La utilización de un sustrato como materia prima, está determinada en función de su idoneidad y de su disponibilidad.

Un sustrato es idóneo para ser usado como materia prima cuando al menos los parámetros explicados anteriormente están dentro de los márgenes permisibles. La disponibilidad es sumamente importante, pues la potencialidad de biogás de cierta materia prima puede ser alta, pero si no se cuenta con el volumen suficiente de materia prima que satisfaga la demanda por parte del proceso, entonces no se puede poner en marcha una planta de biogás.

La materia prima que no se descomponga, mediante la digestión anaeróbica a componentes más simples, no otorga a los microorganismos los elementos necesarios para la producción de biogás, por lo que esta se retrasa o disminuye. Los ensayos BMP permiten saber la biodegradabilidad o (digestibilidad) de la materia prima. Los carbohidratos de bajo peso molecular, los ácidos grasos volátiles, y alcoholes son digeridos en horas. Las proteínas, hemicelulosa y lípidos en días. Materiales como la lignina y/o celulosa necesitan semanas para degradarse completamente. Si la degradación se retrasa el tiempo de retención hidráulica aumenta, esto implica que los volúmenes de los reactores sean mayores, lo cual aumenta el costo de inversión y de operación.

2.1.4 Impurezas e inhibidores en la materia prima

Junto a la materia prima pueden acarrear impurezas que afectan al proceso de digestión anaeróbica. Por ejemplo la arena causa reducción del volumen efectivo del reactor debido a la sedimentación. Virutas de madera o materiales de baja densidad pueden formar capas flotantes o atascar las tuberías. Compuestos inorgánicos, como plásticos, metales o polímeros causan disturbios en el proceso de digestión anaerobia, los cuales muchas veces son difíciles de controlar.

Existen componentes inhibidores que dañan el proceso microbiológico. Pueden retrasar o reducir la productividad de los microorganismos, retardar la actividad microbiológica o incluso detenerla. Estos componentes pueden estar presentes en la materia prima, por ejemplo ácidos grasos volátiles en altas concentraciones, antibióticos, desinfectantes o pesticidas.

2.2 Etapas de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia se desarrolla básicamente en 4 etapas. Estas etapas se van desarrollando de manera paralela y secuencial a la vez. La figura 17 muestra la secuencia de transformación de los productos de la digestión anaerobia con los respectivos insumos y productos para cada etapa.

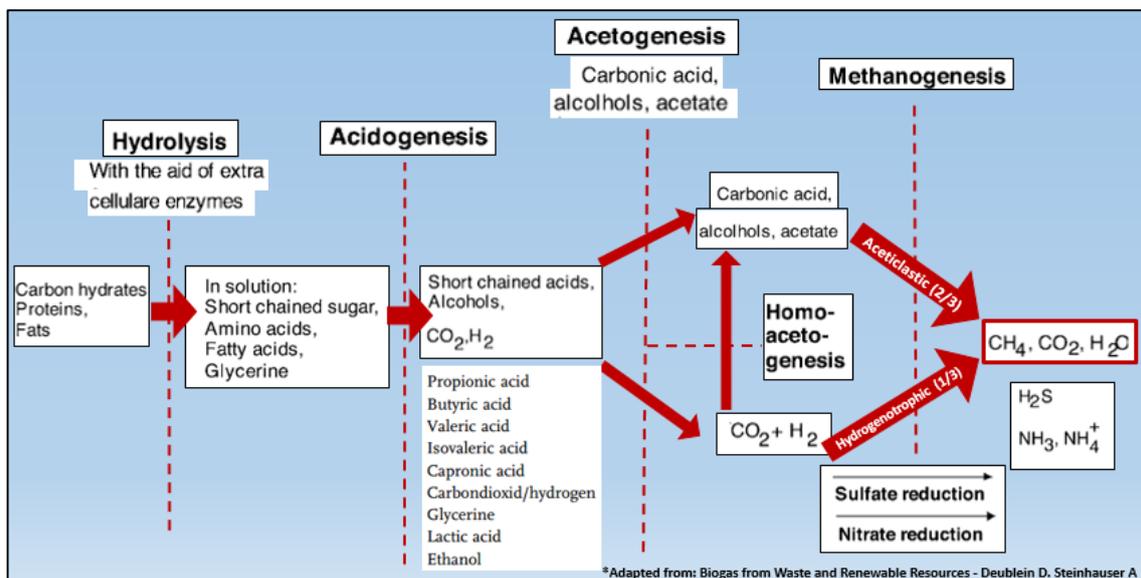


Figura 17. Proceso de digestión anaerobia
Fuente: Adaptado de [11].

El modelo *Anaerobic Digestion Model* N° 1, desarrollado por la Asociación Internacional del Agua (IWA) [14], propone el flujo de la materia orgánica como se muestra en la figura 18. Indica la descomposición de la materia prima, las etapas del proceso y la producción de intermedios hasta la obtención del metano.

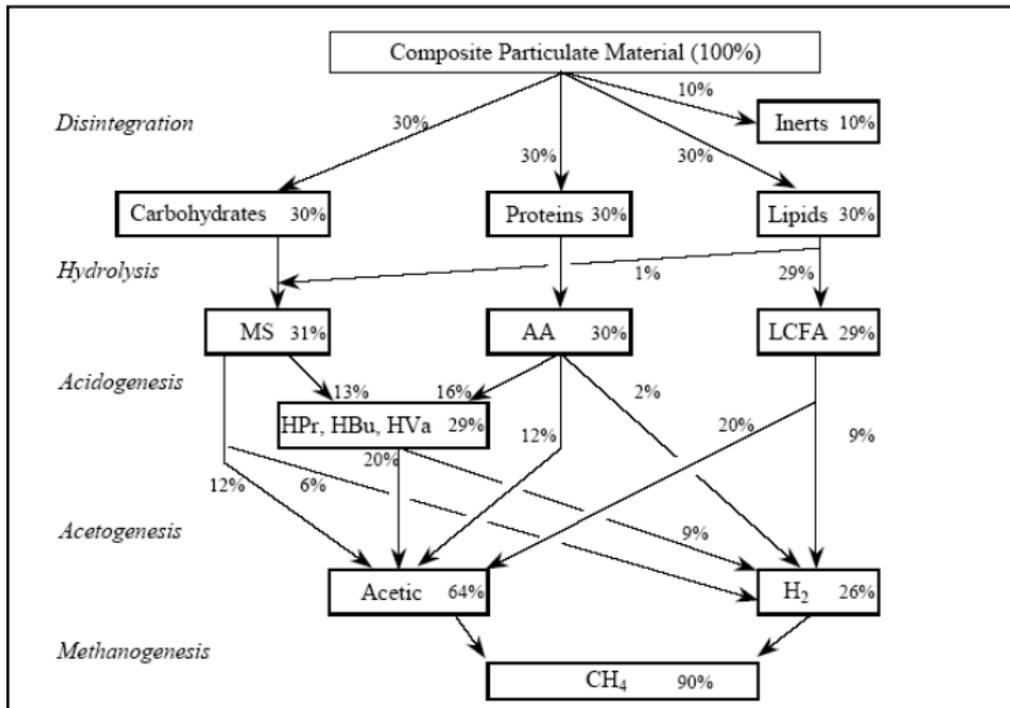


Figura 18. Etapas del proceso de digestión anaerobia de acuerdo al modelo ADM1.
Fuente: Tomado de [14].

2.2.1 Hidrólisis

En esta etapa los componentes orgánicos de la materia prima, principalmente: carbohidratos, proteínas y grasas son desintegrados a componentes más simples. En unas pocas horas los carbohidratos son descompuestos a monosacáridos, y en unos cuantos días las proteínas y grasas son descompuestas en aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga respectivamente. Esta tarea es realizada por las enzimas de los microorganismos que intervienen en la digestión anaerobia. Entre los carbohidratos, la materia prima puede contener estructuras orgánicas complejas como la celulosa o hemicelulosa, incluso lignina.

La hidrólisis puede llegar a ser la etapa limitante del proceso de digestión anaerobia, pues la lignocelulosa, hemicelulosa, celulosa y lignina son resistentes a la degradación anaerobia y su descomposición se produce de manera lenta e incompleta. La hidrólisis de estos compuestos puede llegar a demorar incluso semanas.

Es afectada por niveles de pH alejados del neutro, la alta concentración de amonio y presencia de inhibidores en los mismos subproductos de la hidrólisis. La velocidad de la hidrólisis aumenta con la temperatura. Se favorece con el aumento del área superficial de la materia prima, por lo que la tasa aumenta con los pretratamientos de reducción del tamaño de la materia prima.

2.2.2 Acidogénesis

También llamada fermentación. Es un proceso microbiano anaeróbico, por el cual los monosacáridos y aminoácidos se degradan a compuestos más simples. Los productos de este proceso son ácidos grasos volátiles (VFA o ácidos grasos de cadena corta), alcoholes, dióxido de carbono e hidrógeno. Los principales VFA son ácido acético, butírico, valérico y propiónico.

Los factores más importantes para esta etapa son el nivel de pH en el digestato y la presión parcial de hidrógeno.

Con un nivel de pH > 5 , es mayor la producción de VFA, mientras que para niveles de pH < 5 es mayor la producción de etanol. Si el nivel de pH es menor a 4, el proceso de digestión anaerobia puede detenerse [4].

A bajas presiones parciales de hidrógeno es mayor la formación de acetato e hidrógeno que la de etanol o VFA. Recordemos que el ácido acético es el que posteriormente se convierte en metano por lo que propiciar su producción es imprescindible. La acidogénesis es la etapa más rápida en el proceso de digestión anaerobia [4].

2.2.3 Acetogénesis

La acidogénesis genera ácido acético, hidrógeno, dióxido de carbono, VFA, etanol y compuestos aromáticos. Los tres primeros pueden ser convertidos directamente en metano por los microorganismos metanogénicos. Sin embargo, el etanol, VFA y compuestos aromáticos necesitan de una etapa previa: la acetogénesis.

Los productos de la acetogénesis son ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Los microorganismos acidogénicos requieren de bajas presiones parciales de hidrógeno para poder existir, menores a 10^{-4} atm. Si la concentración de hidrógeno aumentase, la actividad de los microorganismos va decreciendo hasta finalmente detenerse, esto causa acumulación de ácidos lo cual finalmente inhibe a las bacterias productoras de metano de la siguiente etapa.

2.2.4 Metanogénesis

En esta etapa los productos de la acetogénesis (ácido acético, H_2 y CO_2) son convertidos en metano y dióxido de carbono.

El 70% del metano se produce a través de la transformación del ácido acético en metano y CO_2 (vía acetoclástica) y el resto a través de la transformación del H_2 y CO_2 en metano y agua (vía hidrogenotrófica). Sin embargo la vía hidrogenotrófica es necesaria para regular el nivel de presión parcial de hidrógeno en el digestato, lo cual es indispensable para la existencia de los microorganismos de la acetogénesis.

Los microorganismos metanogénicos son muy sensibles a los cambios de temperatura, nivel de pH y alcalinidad del digestato.

2.3 Parámetros de monitoreo de proceso de digestión anaerobia

2.3.1 Temperatura

Es uno de los parámetros más importantes para la digestión anaerobia. La temperatura afecta la cinética de los microorganismos, incluyendo la tasa de crecimiento específico, la constante de saturación media, la tasa crecimiento y la tasa de mortandad [10]. A mayor temperatura, mayor es la tasa de crecimiento de los microorganismos y por tanto mayor es la producción de biogás. Es por ello que el control de la temperatura es fundamental en una planta de biogás. La temperatura debe mantenerse lo más constante posible. Variaciones mayores a ± 2 °C afectan el proceso [11].

De acuerdo a la temperatura los microorganismos de la digestión anaerobia se clasifican en psicrófilicos (< 20 °C), mesófilicos (20 – 40 °C) y termófilicos (45 - 70 °C). En el rango psicrófilico las producciones de biogás son muy bajas y aún se encuentra en estudio.

En el rango termófilico las tasas de producción de biogás son mayores, esto reduce el tiempo de retención hidráulico y por tanto reduce el tamaño del reactor. De acuerdo a [15], en ensayos realizados con residuos vegetales y viruta de madera, la degradación de los VFA se produjo de manera más rápida a 55 °C que a 38°C, además la producción del 95% de metano se logró después de 11 días para el rango termófilico, en comparación con los 27 días para el rango mesófilico. Sin embargo la operación a altas temperaturas aumenta la inestabilidad del proceso y el requerimiento de energía calorífica.

Es por esto que el rango más usado es el mesófilico, pues es un punto medio entre estabilidad y requerimiento de energía calorífica, además se desarrolla naturalmente en los animales rumiantes, por lo que la obtención de microorganismos mesófilicos no es complicada. A pesar de todo esto no existe una temperatura óptima general para las plantas de biogás, sino que depende de cada caso específico en función de la composición de sustrato y su viscosidad, higiene del proceso, diseño de reactor y origen de microorganismos anaerobios [16].

El dióxido de carbono es mucho más soluble que el metano. La solubilidad de los gases en líquidos decrece con el aumento de temperatura, por tanto a mayores temperaturas mayor cantidad de CO₂ abandonará el líquido dando lugar a un mayor porcentaje de CO₂ en el biogás producido, afectando a la eficiencia del proceso [10].

2.3.2 Nivel de pH

La digestión anaerobia se ve perjudicada con pequeñas variaciones del nivel de pH. Cada consorcio de microorganismos posee diferentes rangos óptimos de pH. El nivel de pH óptimo para los acidogénicos oscila entre 5.5 – 6.5, para los acetogénicos y metanogénicos oscila entre 7.8 y 8.2. Siendo los primeros los menos sensibles y los últimos los más sensibles a las variaciones del nivel de pH.

Para un cultivo en el que participan todos estos microorganismos en conjunto, el pH óptimo está en el rango de 6.8 a 7.4, siendo el neutro el ideal. Aunque los límites máximos para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente son 6 y 8 [5]. Estas mismas variaciones en los rangos óptimos de pH han causado que algunos diseñadores realicen las etapas de hidrólisis/acidogénesis y acetogénesis/metanogénesis en sendos reactores separados con un nivel de pH adecuado para cada reactor [16].

Cuando se reduce el nivel de pH por debajo de 6, la concentración de metano en el biogás producido también se reduce drásticamente afectando la eficiencia del proceso, como se muestra en la figura 19.

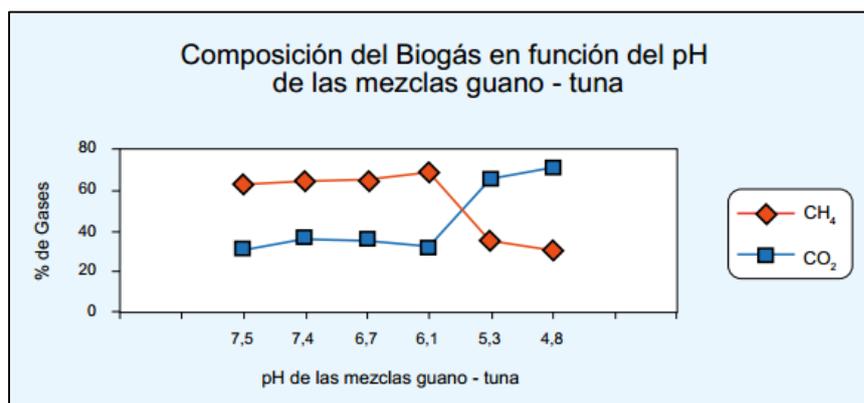


Figura 19. Composición del biogás en función del nivel de pH.
Fuente: Tomado de [5]

A bajos valores de pH se reduce la actividad de los microorganismos metanogénicos, esto produce la acumulación de ácido acético e hidrógeno, el aumento de la presión parcial de hidrógeno inhibe la actividad de los microorganismos acetogénicos. Esto incrementa la acumulación de los VFA, ya que no son convertidos a ácido acético, e inhiben a los microorganismos metanogénicos, además esto reduce aún más el nivel de pH, con lo cual el proceso de digestión anaerobia llega a detenerse. Una de las primeras opciones ante la elevada concentración de VFA es reducir la carga orgánica que alimenta al reactor de tal modo que los VFA se consuman con mayor velocidad de la que se producen hasta que el exceso de VFA se haya agotado. Como consecuencia el pH llegará a condiciones normales de operación y la metanogénesis se reestablecerá. Si la situación no se mejora con la regulación de la carga orgánica, entonces se puede adicionar químicos como hidróxido de sodio, carbonato de calcio, cal, etc. [5].

En la figura 20 se muestra la actividad de los microorganismos metanogénicos en función del nivel de pH del proceso y se muestra como la actividad disminuye cuando se sale de los rangos indicados anteriormente [5].

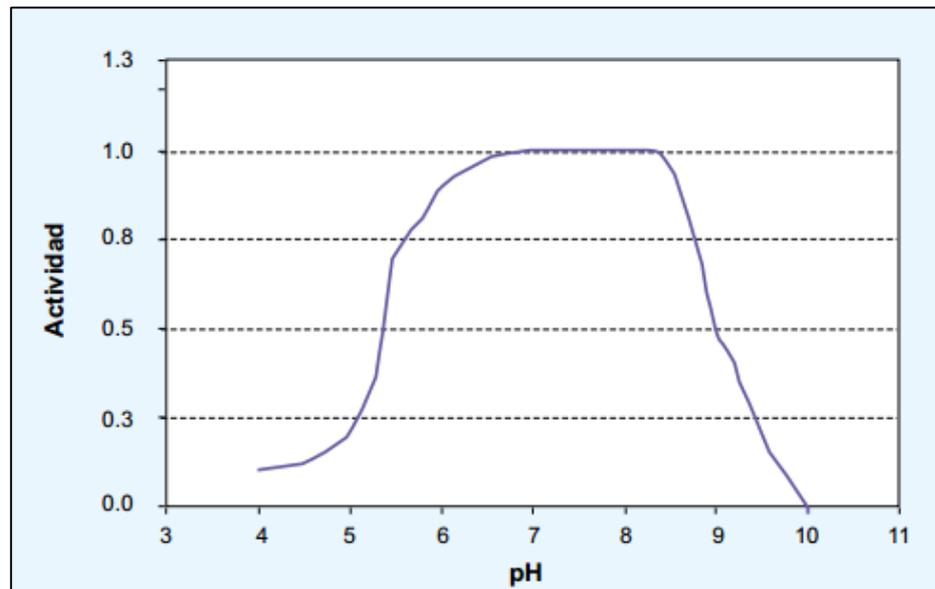


Figura 20. Actividad de microorganismos metanogénicos en función del nivel de pH.
Fuente: Tomado de [5]

Las mediciones de pH *offline* tienen la desventaja de que la muestra entra en contacto con el aire del ambiente y se modifica la presión parcial de hidrógeno con respecto a la que existe en el interior del reactor. Además, la medición *offline* de pH se ve afectada por los errores de muestreo y por la no consideración de factores de corrección por temperatura. En cambio, las mediciones *on-line* tienen la desventaja de requerir mayor mantenimiento de las sondas y de un montaje más costoso [4] [13].

2.3.3 Carga orgánica

Este parámetro se puede medir mediante la materia seca orgánica (ODM) o mediante la demanda química de oxígeno (COD). Para ello se realizan los análisis a la materia prima antes del ingreso al reactor y al digestato a la salida del reactor. También se tiene que tener en cuenta el porcentaje de materia seca (DM).

Una mayor presencia de sólidos (DM) en el digestato implica una mayor viscosidad que afecta la movilidad de los microorganismos, de manera que retrasa la digestibilidad de la materia prima y la conversión a biogás, es decir afecta la eficiencia del proceso. Para biodigestores continuos el máximo nivel de DM en el digestato debe oscilar entre 8 y 12%. Una viscosidad excesiva también afecta los equipos de bombeo y de agitación.

La comparación entre la ODM (sólidos volátiles) de la materia prima al ingreso del reactor y la ODM del digestato a la salida del reactor nos da el porcentaje de reducción de la sólidos volátiles que ha sufrido la materia prima en el proceso de digestión anaerobia. Este porcentaje de reducción de sólidos volátiles oscila entre 30 y 42% para reactores que sólo usan estiércol como materia prima. A mayor porcentaje de reducción de sólidos volátiles, menor es la presencia de sólidos y mayor es la reducción de olores en el digestato [17].

2.3.4 Producción y calidad del biogás

La producción es la cantidad de biogás producido por unidad de tiempo ($m_{gas}^3/día$) o por unidad de materia prima ($m_{gas}^3/kg_{materiprima}$), mientras la calidad está representada por la concentración volumétrica o másica de metano en el biogás. Estos dos parámetros determinan la eficiencia del proceso de digestión anaerobia.

Para garantizar que el biogás sea capaz de combustionar el porcentaje de metano debe ser del 50% como mínimo. El ratio CH_4/CO_2 por lo general es constante durante el proceso y una variación significativa se da solamente después de que un disturbio en el proceso ya ha ocurrido. Este ratio depende, entre otros factores, de la composición de sustrato, de la temperatura, del nivel de pH y de la cantidad de materia seca orgánica (ODM) que ha sido descompuesta en el proceso. Por lo que para encontrar las causas de las variaciones se las debe analizar conjuntamente con los demás parámetros del proceso.

También es recomendable medir las concentraciones de H_2S presentes en el biogás, pues altas concentraciones de este componente indican inestabilidad en el proceso, ya que el H_2S es un gas venenoso que causa inhibición en los microorganismos. Además, de cara a la utilización del biogás, es corrosivo para tuberías y motores.

La medición de la producción se puede realizar mediante sensores de flujo por principio ultrasónicos, de fluidistor, de turbina, de vórtice, de presión dinámica, térmicos y de diafragma.

En el escenario real de una planta de biogás, la medición del flujo debe tener un cuidado especial pues es afectada por factores como la suciedad en el biogás, corrosión, humedad, baja presión, etc. Para evitar estos factores se puede someter al biogás crudo a un pretratamiento de limpieza, filtrado y deshumidificación con la intención de no perjudicar a los sensores de flujo. Sin embargo con esto se perdería la información acerca de la situación real del proceso, que es lo que realmente se busca con el monitoreo.

De acuerdo con [13], las mediciones por principio ultrasónico y de fluidistor son las mejores, pues son menos afectadas por la humedad, la corrosión y las bajas presiones.

Así también existen equipos sofisticados para la medición de las concentraciones de los componentes del biogás, como los cromatógrafos de gases, además de equipos portátiles que poseen sensores electroquímicos y de infrarrojo. Ambos deben ser debidamente calibrados y certificados.

En ensayos BMP, la producción de biogás y la concentración de metano también suele medirse por desplazamiento volumétrico y trampas de hidróxido de sodio para el CO_2 , de acuerdo a la norma VDI 4630. En este método se debe tener mucho cuidado con las fugas en las conexiones, la solubilidad del biogás y la evaporación del líquido de desplazamiento. En el presente estudio se realizaron mediciones usando este método, por lo que se explicará posteriormente con más detalle.

2.3.5 Nitrógeno amoniacal

El nitrógeno amoniacal es la suma del amonio (NH_4^+) y el amoniaco (NH_3). Ambos resultan de la hidrolización del nitrógeno orgánico contenido en las materias primas ricas en proteínas, como por ejemplo el estiércol vacuno y porcino (residuos de industria agropecuaria). Aunque el nitrógeno amoniacal es necesario para el crecimiento de los microorganismos, su concentración excesiva puede limitar el crecimiento de los mismos. De ambas especies el que mayor efecto inhibitorio posee es el amoniaco.

La cantidad de amoniaco que se produzca durante la digestión anaerobia depende de la concentración de la materia prima, de la relación C/N que tenga, de la alcalinidad del digestato y de la temperatura del proceso.

Los cambios repentinos de materia prima pobre en nitrógeno a materia prima rica en nitrógeno causan problemas en el proceso de digestión anaerobia. Para poder realizar estos cambios sin dañar el proceso se tiene que procurar un buen nivel de adaptación de los microorganismos, una adecuada relación C/N y baja concentración de sulfuro de hidrógeno.

Los niveles de nitrógeno amoniacal total pueden ser medidos según las norma americana “*APHA 4500-NH3-Nitrogen*” (APHA, 1998) o la norma alemana “*DIN 38406-5:1983-10*” (1983).

2.3.6 Ácido grasos volátiles (*Volatile Fatty Acids* - VFA)

También conocidos como ácidos grasos de cadena corta (LCFA). En el proceso de digestión anaerobia, este grupo de ácidos está compuesto predominantemente (en orden descendente) por ácido acético, ácido butírico, ácido propiónico, y en menores cantidades por los ácidos isobutírico, valérico, isovalérico y capriónico. Son producidos en la etapa de acidogénesis y usados como sustratos en las etapas de acetogénesis y metanogénesis.

La concentración de VFA es el parámetro más sugerido y utilizado para monitorear y controlar el proceso de digestión anaerobia. Hasta ahora se lo presenta como el mejor parámetro para indicar la estabilidad de un sistema de digestión anaerobia ya que la concentración de VFA contiene información acerca del medio interno y del desarrollo del proceso de digestión anaerobia.

La acumulación de VFA en un proceso de digestión anaerobia tiene dos posibles causas. La primera es que se deba a la sobrecarga orgánica, es decir, el flujo de materia prima a la entrada del reactor es muy elevado, por lo que la cantidad de VFA que se generan durante la acidogénesis es mayor a la que pueden asimilar los microorganismos acetogénicos y metanogénicos en un tiempo determinado. La segunda interpretación es que la acumulación de VFA se deba a la inhibición de los organismos metanogénicos provocada por otros factores, como por ejemplo una elevación de temperatura, lo cual aumenta la concentración de amoníaco y produce inhibición en los organismos metanogénicos.

Es por lo anterior que en sistemas con una capacidad buffer baja el monitoreo de la estabilidad del proceso se puede hacer mediante la medición de pH y alcalinidad y/o la medición de la concentración de VFA. Pero en un sistema con capacidad buffer media o elevada, el monitoreo de la estabilidad del sistema sólo es capaz de realizarse mediante la medición de la alcalinidad y la concentración de VFA.

La medición de la concentración individual de los VFA se realiza mediante cromatografía de gases o cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC) o cromatografía de masas. Estos métodos son muy precisos, la desventaja es que se realizan de modo *offline* y son costosos. Sin embargo existen estudios para la medición *online* de la concentración de los VFA mediante la cromatografía de gases de la cabecera del reactor [18]. También existen estudios para medir las concentraciones individuales de los VFA mediante espectrometría [19].

Además la concentración total de VFA puede ser medida de manera *offline* mediante titulación manual y de manera *online* mediante fotometría, sin embargo en este último caso, dependiendo del tipo de materia prima, muchas veces se requiere de un pretratamiento del digestato. También existen estudios para medirla mediante titulación *online* [20].

2.3.7 Relación de alcalinidad (FOS/TAC, VFA/TA, IA/PA, VFA/ALK o VFA/Bicarbonato)

El aumento de la capacidad tampón de un digestato se consigue mediante la reducción de la carga orgánica (reducción del flujo de ingreso de materia prima), aunque la adición directa de bicarbonato es una solución más rápida. También se consigue mediante el incremento de temperatura, pues la concentración de amoníaco, que le da capacidad tampón al medio, aumentará. Sin embargo concentraciones de amoníaco fuera de los rangos admisibles del medio van a inhibir a los microorganismos metanogénicos. Esto provocará mayor acumulación de ácido acético.

Este parámetro se obtiene mediante una titulación de dos puntos. El primero es la alcalinidad intermedia (FOS, VFA o IA), y lo que indica es el nivel de acumulación de VFA, por tanto es un indicador relevante de la situación del proceso. El segundo es la alcalinidad parcial (TAC, TA, PA, ALK o Bicarbonato), representa la alcalinidad del bicarbonato en el medio y es una medida de la capacidad tampón del reactor. Por tanto, con estos valores se puede tener una relación entre la acumulación de los VFA y la capacidad tampón que tiene el digestato para neutralizar esta acumulación. De acuerdo al ratio que se calcule corresponde un diagnóstico de carácter empírico de la situación del proceso de digestión anaerobia. Esto se muestra en la tabla 6.

Tabla 6: Reglas empíricas para ratio de alcalinidad (Instituto DEULA - NIENBURG)

FOS/TAC ratios	Background	Measure
>0.6	Highly excessive biomass input	Stop adding biomass
0.5–0.6	Excessive biomass input	Add less biomass
0.4–0.5	Plant is heavily loaded	Monitor the plant more closely
0.3–0.4	Biogas production at a maximum	Keep biomass input constant
0.2–0.3	Biomass input is too low	Slowly increase the biomass input
<0.2	Biomass input is far too low	Rapidly increase the biomass input

Fuente: Tomada de [13]

La alcalinidad parcial se mide por titulación desde el pH original de la muestra hasta 5.0 de pH. Luego la alcalinidad intermedia desde el pH 5.0 hasta 4.4, la relación se determina con la relación siguiente [13] [21].

$$\frac{FOS}{TAC} = \frac{(1.66 * B - 0.15) * 500 [mgHAc - eq/L]}{250 * A [mgCaCO_3/L]}$$

Donde:

A: Volumen de ácido añadido desde el original hasta pH 5.0 en ml

B: Volumen de ácido añadido desde pH 5.0 hasta pH 4.4 en ml

Esta doble titulación, en modo *offline*, se puede realizar manualmente. En este caso la desventaja es la mayor probabilidad de cometer errores, así como la mayor demanda tiempo, obviamente el costo económico es muy bajo. En modo *offline* también se puede realizar mediante equipos de titulación automática, se obtienen los resultados en segundos, la medición es más precisa, sin embargo son equipos costosos. Además de esto, también existen equipos de titulación automática que realizan la medición de manera *online*, algunos están aún en desarrollo, ya que se requiere de una etapa de pretratamiento de la muestra de digestato debido a la turbidez. Esto último requiere una mayor inversión económica.

2.3.8 Agitación

Actualmente no existe un consenso unánime y general entre los investigadores con respecto al modo, intensidad y patrón de agitación. Pues, así como existen estudios que señalan que la agitación aumenta la producción de biogás, existen estudios que reportan lo contrario.

Sin embargo, las investigaciones recomiendan que durante la puesta en marcha del proceso, la intensidad de la agitación debe ser baja, para permitir el crecimiento de los microorganismos anaerobios y aliviar el proceso de inestabilidades [22].

En los experimentos señalados en [23], se reporta que la conversión del propionato en ácido acético decrece con el aumento de la intensidad de la agitación. Además indican que a bajas intensidades de agitación la sobrecarga orgánica es mejor tolerada, y de este modo se evitan acidificaciones y consecuentes fallas en el proceso. Estos experimentos fueron realizados en reactores SCTR usando residuos sólidos municipales. Aún no se tiene evidencias claras de por qué las altas intensidades de agitación afectan la eficiencia del proceso. Pero se propone la teoría de que las altas intensidades rompen las formaciones granulares que adoptan los microorganismos anaerobios para proliferar en un medio [15].

El consumo de energía para la agitación está determinado por el tipo de agitación, el tipo de materia prima y la concentración de materia seca (DM). Según [22], en plantas de biogás de gran escala, la agitación consume entre un 14% - 54% de la energía demandada por la planta. Además se reporta que la demanda se reduce entre un 12% - 29% si la agitación continua es reemplazada por la intermitente.

A pesar de los desacuerdos con respecto a este tema, se puede decir que la agitación aumenta la eficiencia del proceso y disminuye el tiempo de retención hidráulica por lo siguiente: previene la estratificación de la materia prima en el reactor, la formación de espumas y de incrustaciones. Todo esto propicia un contacto activo entre la materia prima y los microorganismos, distribuye efectivamente la materia prima y diluye las sustancias inhibidores. En plantas de

gran escala la sedimentación en el fondo reduce el volumen eficaz del reactor, aumenta la carga orgánica requerida y reduce el tiempo de retención hidráulica [10].

Los sistemas de agitación usados actualmente son mecánicos (hélices, paletas, tornillos, etc.), hidráulico (mediante recirculación del digestato) y neumático, mediante el burbujeo del biogás desde el fondo del reactor. El objetivo de un sistema de agitación es mantener la mayor cantidad de sólidos en suspensión con la menor demanda de energía posible, sin afectar la producción de biogás [10].

2.3.9 Tiempo de retención hidráulica (HRT)

Es el tiempo teórico de permanencia de la materia prima en el reactor. En la realidad no siempre se cumple este tiempo, porque en sistemas como los de CSTR muchas veces la nueva materia prima que ingresa inmediatamente sale del sistema (a esto se le llama cortocircuito).

$$HRT [days] = \frac{Volume_{neto_{reactor}}[m^3]}{Ingreso\ de\ materia\ prima[m^3/day]}$$

Con un HRT bajo solamente la materia orgánica de fácil degradabilidad será metanizada, pues los microorganismos requieren de mayor tiempo para degradar los compuestos complejos como la lignina, celulosa, hemicelulosa, etc. Con un HRT menor a 20 días no se degradarán completamente la mayoría de las materias primas provenientes de residuos agrícolas [24]. Además con un HRT muy bajo se corre el riesgo de desalojar prematuramente los microorganismos del reactor y que no permanezcan el tiempo suficiente como para metanizar la materia prima (a esto se le llama lavado de microorganismos). Para evitar el lavado, el HRT no debe ser menor a 10 días [10]. En cambio, un HRT elevado implica un mayor volumen del reactor, lo cual aumenta los costos de inversión y a una misma tasa de alimentación, reduce la eficiencia de la planta ($Nm^3_{biogas}/m^3_{reactor}$) [13].

2.3.10 Tasa de carga orgánica (Organic Load Rate - OLR)

Es la medida de la cantidad de ODM o de COD (demanda química de oxígeno) que ingresa al reactor por unidad de volumen reactor por unidad de tiempo.

$$OLR \left[\frac{kg_{ODM}}{m^3 \cdot d} \right] = \frac{Masamatprima_{dia}[kg/día] \times DM_{masprim}[\%] \times ODM_{DM}[\%]}{Volume_{reactor}[m^3]}$$

Cuando la OLR es baja la producción de biogás también será baja, si la OLR es elevada se corre el riesgo de que se produzcan sobrecarga y como consecuencia acidificación en el reactor. Por lo que para cada planta existe un OLR óptimo. En el arranque de la planta el OLR debe ser bajo, luego se debe incrementar gradualmente para permitir que los microorganismos se adapten a la nueva carga en el medio.

Las OLR óptimas para procesos mesofílicos oscilan entre 3 a 5 $kg_{ODM}/m^3.dia$. En la práctica existen muchas plantas que, para reducir la posibilidad de problemas por sobrecarga, operan muy por debajo de su OLR óptimo, por tanto presentan un alto potencial no aprovechado y por ende una baja eficiencia. Se han dado casos en los que duplicando la OLR de una planta se ha duplicado la producción de biogás sin necesidad de aumentar el volumen del reactor o instalar reactores adicionales [25].

Capítulo 3:
Diseño e implementación de prototipos

3.1 Cámara de ensayos de Potencial Bioquímico de Metano (BMP)

El ensayo BMP es un experimento tipo batch, de pequeña escala, que nos permite determinar con mayor veracidad el potencial de producción de biogás y abono que tiene cierta materia prima cuando es sometida a un proceso de digestión anaerobia. Para su realización se siguen las normas técnicas alemanas VDI – 4630 y DIN – 38414. La implementación de esta cámara tiene la intención de realizar ensayos para determinar el BMP de los residuos orgánicos que están disponibles en nuestra región.

3.1.1 Descripción

El proceso de digestión anaerobia requiere de una temperatura constante de aproximadamente 38°C con variaciones menores a $\pm 2^\circ\text{C}$ para evitar la inhibición de los microorganismos. Por tanto la cámara tiene que contar con un sistema de control de temperatura.

En el interior de la cámara van colocados los reactores, los cuales contendrán los residuos orgánicos inoculados con los microorganismos anaerobios.

El biogás producido por cada reactor fluirá hacia el exterior de la cámara a través de una manguera hasta el sistema de medición de producción de biogás. En esta etapa se medirá el volumen de gas producido y su concentración de metano. La figura 21 esquematiza los bloques que componen la cámara BMP.

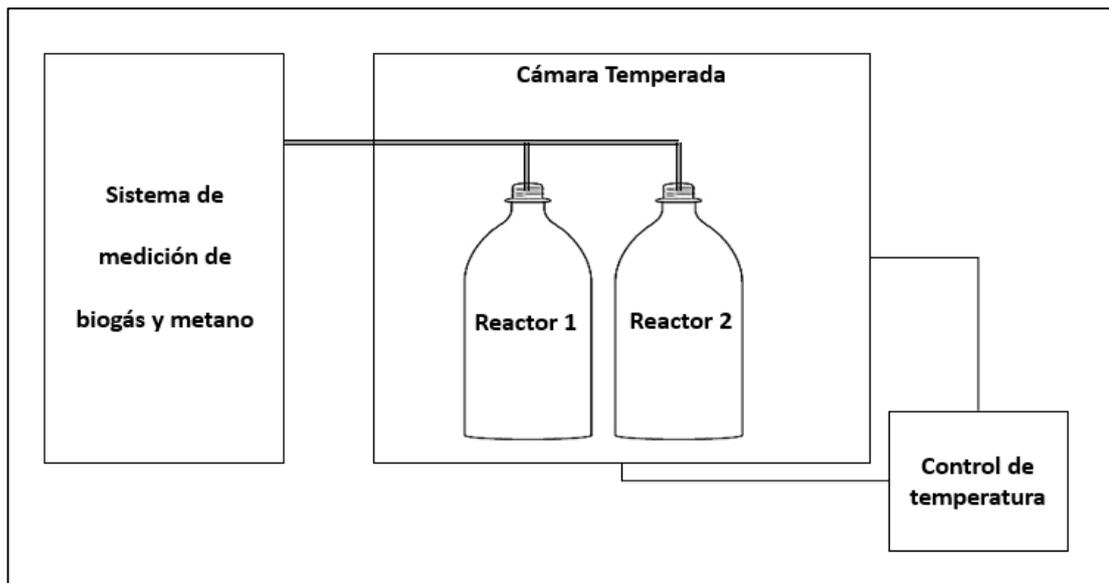


Figura 21. Cámara de ensayos de potencial bioquímico de metano

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Componentes

De acuerdo a la esquematización de la figura 11, a continuación se describe cada componente y su función.

3.1.2.1 Cámara temperada

El requisito para este componente es que sea capaz de mantener una temperatura constante durante la duración del ensayo (aproximadamente 30 días). El medio conductor del calor en la cámara puede ser agua o aire.

Comercialmente existen cámaras que poseen un baño maría, como el mostrado en las figuras 4 y 5, o que funcionan a manera de un horno eléctrico. En el prototipo implementado se utilizó un baño maría. A continuación los subcomponentes de la cámara temperada.

a) Recipiente

Como cámara se utilizó un recipiente plástico de 90 litros de volumen, ver figura 22. Contaba con tapa y se le acondicionó agujeros para la salida de las mangueras de cada reactor.



Figura 22. Caja plástica utilizada como recipiente para cámara temperada.
Fuente: Elaboración propia.

b) Reactores

Los reactores fueron botellas de vidrio de 1 litro de volumen, sellados con tapones de jebe, los cuales contaban con un orificio para la salida del biogás generado, ver figura 23.



Figura 23. Botella de vidrio de 1 litro.
Fuente: Elaboración propia

3.1.2.2 Selección de *heater* para baño maría

Primero calculamos la energía necesaria para elevar la temperatura de los 90 litros de agua, desde la temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C), hasta los 38 °C requeridos por los reactores.

$$Q = m \cdot C_e \cdot (T_f - T_i)$$

Donde:

- Q : Calor requerido [kJ]
- m : Masa de agua a calentar [kg]
- C_e : Calor específico del agua ($4186J/kg^{\circ}K$)
- $T_f; T_i$: Temperatura final y temperatura inicial respectivamente [K]

Aplicado al agua en el tanque y asumiendo que el tanque está aislado térmicamente.

$$Q = 90kg \cdot \frac{4186J}{kg \cdot K} \cdot (311 - 298)K = 4897kJ$$

Asumiendo que el cambio de temperatura del agua se da en una hora, entonces la potencia de la resistencia eléctrica deber ser como se indica.

$$P = \frac{W}{t} = \frac{4897kJ}{3600 \text{ seg}} = 1.36kW$$

Con este dato se seleccionó una resistencia de 1.8kW.

3.1.2.3 Control de temperatura

El baño maría fue calentado mediante una resistencia eléctrica de 1800 watts. Se utilizó el controlador de temperatura comercial (REX-C900), este es un controlador on-off, y se utilizó una termocupla tipo J para sensar la temperatura del baño maría y cerrar el lazo de control, también se utilizó un relé. En la figura 24 se pueden apreciar estos elementos.



Figura 24. a) Controlador REX-C900, b) resistencia, c) termocupla y d) relay de 220V
Fuente: Elaboración propia

Los elementos de control fueron acondicionados en una caja de paso, como se aprecia en la figura 25.



Figura 25. Elementos de control montados en cámara
Fuente: Elaboración propia

En la figura 25 se puede apreciar el heater instalado en la base del recipiente, y la termocupla. El relay, así como también una llave termomagnética se encuentra en la caja de paso, mientras el controlador se encuentra adosado a la misma.

3.1.2.4 Sistema de medición de biogás y metano

El biogás generado en cada reactor es conducido mediante una manguera de plástico hasta el exterior de la cámara donde se encuentran los elementos para la medición de volumen. La medición del volumen de gas generado se realizó mediante desplazamiento de líquido. Para medir solamente el volumen de metano se utilizó un filtro de una solución de hidróxido de sodio para solubilizar el dióxido de carbono y dejar fluir solamente el metano.

c) Desplazamiento de líquido

En la figura 26 se muestra el esquema del sistema de medición de volumen. Se utilizó una botella de vidrio de 1 litro, y una probeta milimetrada de 200 ml. Cabe mencionar que este sistema de medición puede ser aplicado tanto para medir el volumen de biogás o de metano, con la única salvedad de que para el primer caso, se debe usar una solución ácida (pH ~3) en vez de agua, para evitar obtener una medición errónea debido a la solubilización del CO₂.

El gas que se genera es conducido por la manguera 1 hasta la cabecera de la botella de desplazamiento. Cuando la presión del gas en la cabecera vence la presión atmosférica y la presión hidrostática, el líquido fluye a través de la manguera 2 y luego puede ser medido en la probeta milimetrada. Inicialmente el volumen de líquido medido en la probeta equivale al biogás generado.

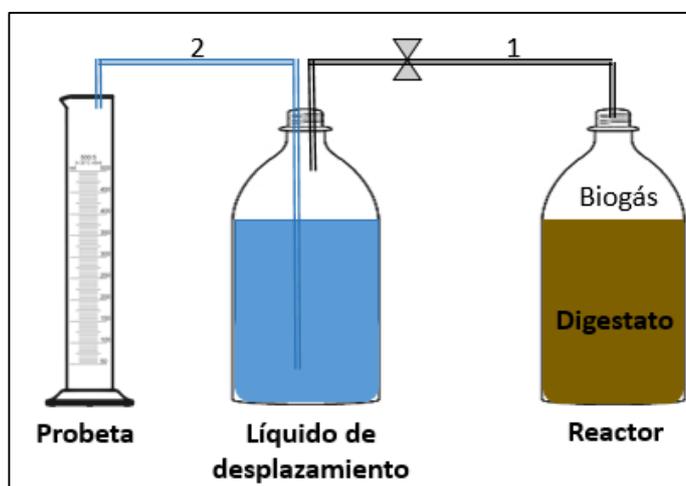


Figura 26. Medición de volumen de biogás (por desplazamiento de líquido)
Fuente: Elaboración propia

El biogás obedece la ecuación de gases ideales [10]. De acuerdo con [12] y [26], para obtener resultados que se puedan comparar con otros estudios, y para contrarrestar las expansiones y compresiones que sufre el gas en función de la variación de la temperatura; se expresa el volumen de gas en condiciones normales. Esto es 273 K de temperatura y 1.013kPa de presión).

En la cabecera de la botella de desplazamiento están presentes la presión atmosférica, la presión hidrostática del líquido de desplazamiento, la presión del gas y la presión de vapor de agua. Por tanto para obtener la presión del gas se debe sumar la hidrostática a la presión atmosférica y sustraer la presión de vapor del agua [10].

Luego para calcular el volumen del gas a condiciones normales y sin la presión de vapor (gas seco), se usa la ecuación (1) obtenida a partir de la ecuación de gases ideales, de acuerdo con [12].

$$V_N = V \cdot \frac{(p-p_w)}{p_N} \cdot \frac{T_N}{T} \dots\dots (1)$$

Donde:

V_N : Volumen del gas seco en condiciones normales.

V : Volumen del biogás medido en el líquido.

p : Presión atmosférica más presión hidrostática.

p_w : Presión de vapor de agua (depende de la temperatura y de la presión atmosférica).

T_N, p_N : Temperatura normal (273 K) y presión normal (101.3 kPa).

T : Temperatura del biogás en la cabecera del líquido de desplazamiento

La presión de vapor (p_w) del agua en el aire está en función de la temperatura y puede ser calculada por medio de una de las relaciones disponibles en la bibliografía, en nuestro caso se utilizó la relación de Antoine [27].

Las mediciones de temperatura fueron realizadas una vez al día, al mismo tiempo que se hacían las mediciones de producción de volumen.

Cuando se agotaban el líquido de desplazamiento se cerraba la válvula en la manguera 2 y se recargaba la botella.

d) Filtro de dióxido de carbono

Este es un *scrubber* compuesto por una solución de hidróxido de sodio 1 molar (40 gramos de hidróxido de sodio en 1 litro de agua). Además se recomienda agregar una pequeña cantidad de fenolftaleína. Este indicador perderá su color rosado cuando la solución alcance un pH menor a 8.2. Cuando la solución esté a punto de volverse transparente quiere decir que el scrubber está saturado de CO₂, y que por lo tanto es tiempo de cambiar la solución.

Esta solución se colocó en un matraz Erlenmeyer de 250 ml. Este recipiente fue sellado con un tapón de jebes. El biogás es burbujeado en la solución de hidróxido de sodio. El CO₂ se solubiliza en el hidróxido de sodio (formando carbonato de sodio y agua). Luego solamente el metano fluye a través de la manguera 2 hasta la cabecera de la botella de desplazamiento para la medición de volumen. En la figura 27 se esquematiza el filtrado de CO₂ por hidróxido de sodio.

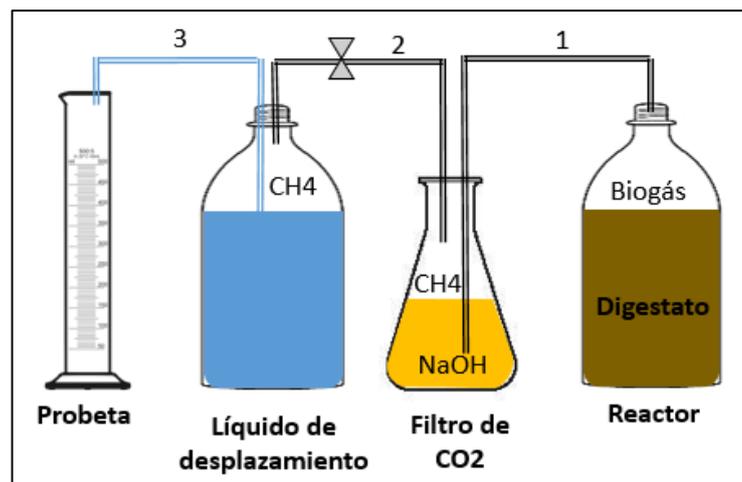


Figura 27. Filtrado de CO₂ por solución de hidróxido de sodio
Fuente: Elaboración propia

La medición del volumen de líquido desplazado se realizó de manera manual, mediante inspección visual del nivel de líquido en la probeta. La lectura de las mediciones se realizó una vez al día a la misma hora. Durante la inspección se leía la temperatura ambiente para aplicar un factor de corrección a las mediciones.

Este sistema se implementó con el objetivo de medir el porcentaje de metano en el biogás producido por un determinado sustrato. Para ello cada tipo de materia prima o sustrato fue sometido a dos reactores en las mismas condiciones. El biogás del primero será medido aplicando el esquema de la figura 26. Mientras que el biogás del segundo será filtrado mediante el esquema de la figura 27. De este modo teniendo ambas producciones se deducirá la concentración del metano en el biogás producido por un determinado sustrato.

3.1.3 Implementación

Se montaron 6 reactores. El nivel de agua del baño maría tiene que estar encima del nivel de líquido en los reactores. Los 6 reactores se distribuyeron en el recipiente de tal modo que no estén muy cerca del foco de calor (la resistencia eléctrica), para que todos estén sometidos a la misma temperatura.

El sistema conformado por el controlador REX-C900, la termocupla y la resistencia eléctrica mantuvieron la temperatura del baño maría constante a 38°C.

El controlador REX-C900 es un controlador de temperatura comercial y funciona en modo on-off. La tensión de alimentación de la resistencia eléctrica es de 220 VAC. Cuando el sensor lee que la temperatura está por debajo de los 38 °C el relay cierra el circuito y la resistencia es alimentada con los 220 VAC hasta que la termocupla lee que la temperatura del agua es de 38 °C, entonces el relay abre el circuito.

En la figura 28 se muestra el circuito del controlador de temperatura implementado, además en la figura 29 se puede ver la evolución de la temperatura para este tipo de controlador.

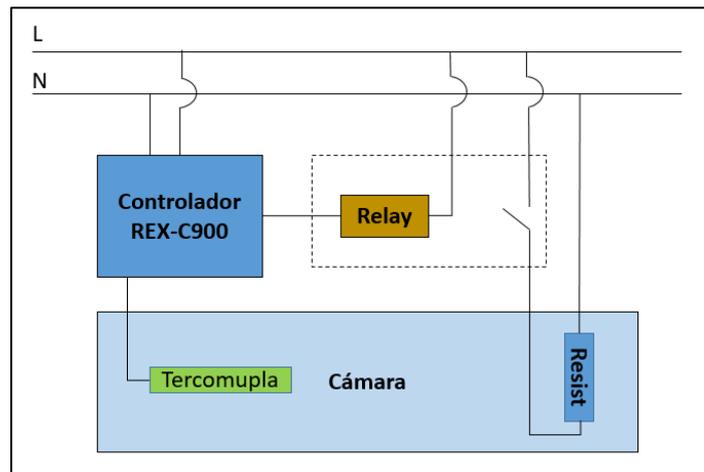


Figura 28. Diagrama de sistema de control de temperatura de cámara BMP
Fuente: Elaboración propia

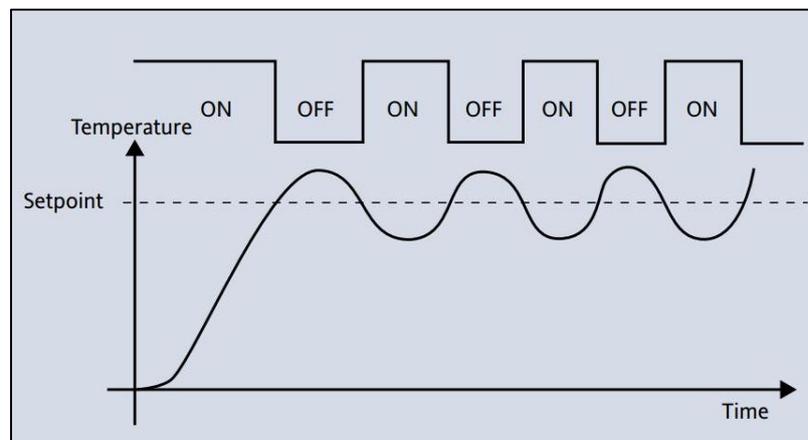


Figura 29. Sistema de control de temperatura modo on-off
Fuente: Tomado de <http://www.eurotherm.se>

En 3 de los 6 reactores se midió la producción de biogás y en los otros 3 se midió la producción de metano. Por tanto se implementaron 3 sistemas de medición de volumen con filtrado de CO₂ para medir el metano (figura 27) y 3 sistemas de medición de biogás (figura 26). En la figura 30 se aprecia el sistema BMP antes de la puesta en marcha.



Figura 30. Sistema BMP antes de la puesta en marcha.
Fuente: Elaboración propia

La particularidad de este sistema es que la misma agua del baño maría fue utilizada para temperar el reactor semicontinuo. Para esto se utilizó una bomba de pecera. Esto se detalla en la implementación del prototipo semicontinuo.

3.2 Reactor semicontinuo de tanque agitado

Este equipo sirve para simular a escala de laboratorio el proceso de producción de biogás de una planta de dimensiones industriales. Tiene como objetivos ensayar la alimentación continua del reactor con residuos orgánicos, monitorear los principales parámetros del proceso de digestión anaerobia, posibles inhibiciones, pretratamientos de la materia prima, etc. En él se monitorea la producción de biogás y se ensaya variaciones de los parámetros para conseguir una mayor producción y calidad de biogás y de abono. También sirve para validar los modelos matemáticos de los procesos de digestión anaerobia que se están estudiando.

3.2.1 Descripción de componentes

3.2.1.1 Tanque de reactor

Se utilizó como tanque un balde de 20 litros con tapa. Su material es polietileno de alta densidad (HDPE). Se optó por el color transparente para poder ver el nivel del líquido o del sobrenadante que se generase.



Figura 31. Balde de HDPE usado como tanque para reactor
Fuente: Elaboración propia

3.2.1.2 Sistema térmico

Como ya se ha mencionado, los microorganismos de la digestión anaerobia en el rango mesofílico requieren una temperatura fija en los 37 o 38 °C con variaciones menores a ± 2 °C. Para conseguir esto se acondicionó una chaqueta de agua alrededor del balde, ésta consistía en una manguera plástica de $\frac{3}{4}$ " que envolvía toda el toda el área longitudinal del balde, ver figura 32.



Figura 32. Chaqueta de agua temperada
Fuente: Elaboración propia

El agua temperada provenía del recipiente BMP. Para la circulación del agua se utilizó una bomba de pecera de flujo máximo de 800 L/h, altura máxima de 1 m y potencia de 10 W, ver figura 33.



Figura 33. Bomba para circulación de agua en chaqueta de reactor.
Fuente: Elaboración propia

El recipiente BMP contaba con una tapa para mantener el aislamiento térmico, ver figura 25 y el reactor semicontinuo también contaba con un aislamiento térmico para evitar la fuga del calor o un cambio brusco de temperatura en la chaqueta debido a variaciones de la temperatura ambiente. El aislamiento se proporcionó mediante paredes de tecnopor, ver figura 34.

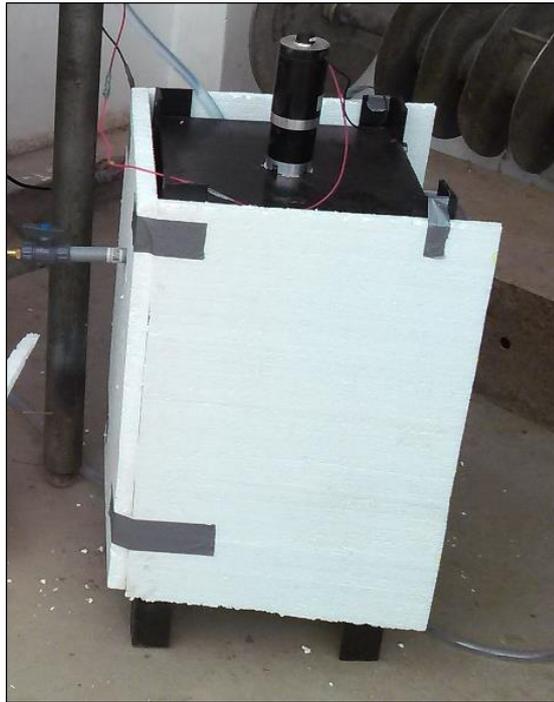


Figura 34: Aislamiento térmico de reactor continuo
Fuente: Elaboración propia

3.2.1.3 Sistema agitador

Se implementó un agitador mediante un eje de $\frac{1}{2}$ ". Luego de realizar las simulaciones en el software CFD Ansys Fluent se determinó que lo más conveniente era utilizar 3 impulsores para que la remoción del líquido se de en todo el volumen del reactor, además la velocidad del flujo debería ser como mínimo 30 RPM, ver figura 35.

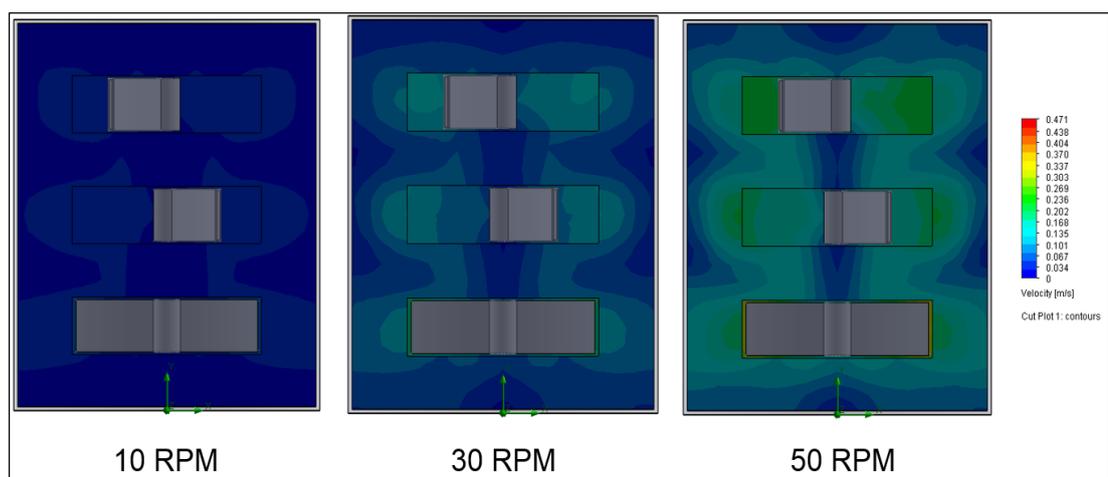


Figura 35. Simulación de agitación de reactor en Ansys Fluent.
Fuente: Cortesía de Ing. Juan Moreano

Como se indicó en el apartado 2.3.3.1 no existe un consenso unánime con respecto al patrón de agitación en un reactor de digestión anaerobia. El motor que se tenía disponible para implementar este prototipo proporcionaba una velocidad de 33 RPM, lo cual estaba dentro del rango de las simulaciones, y además dentro de las aplicaciones de laboratorio documentadas en la bibliografía [22].

Se utilizó un motor DC con caja reductora, con una potencia de 30W, con torque a la salida de la caja reductora es de 82.6kgf-cm a 33RPM, el cual fue alimentado con una fuente DC de 24V, ver figura 36.

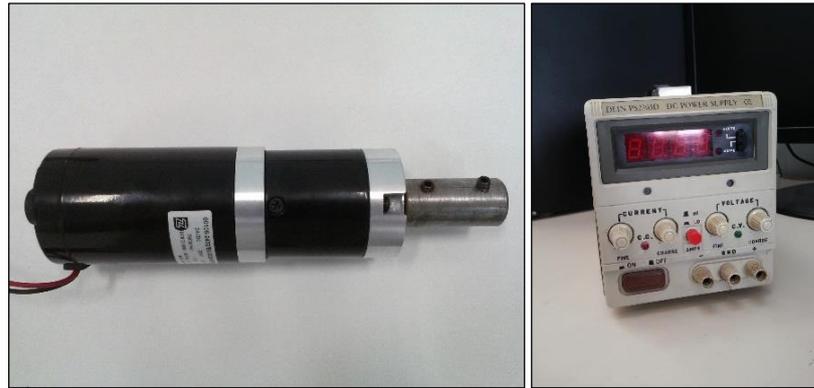


Figura 36. Izquierda: Vista del DC Gear Motor de 33RPM con acoplamiento rígido.
Derecha: Fuente de alimentación de 24VDC.
Fuente: Elaboración propia

El eje consistió en una varilla de $\frac{1}{2}$ " de 51 cm de longitud. El material del eje fue acero inoxidable para contrarrestar el efecto corrosivo del medio y evitar la generación de componentes tóxicos a los microorganismos. Los tres impulsores fueron fabricados mediante impresión 3D utilizando como material plástico ABS (acrylonitrile butadiene styrene), el cual también es resistente a la corrosión e inocuo al medio. Se utilizó la impresora *Makerbot Replicator 2X*, disponible en el Laboratorio de Sistemas Automáticos de Control de la Universidad de Piura. Cada impulsor tuvo una longitud de 160mm, altura de 25mm y espesor de 6mm. Estas dimensiones fueron sugeridas por la simulación realizada en Ansys Fluent, ver figura 37.

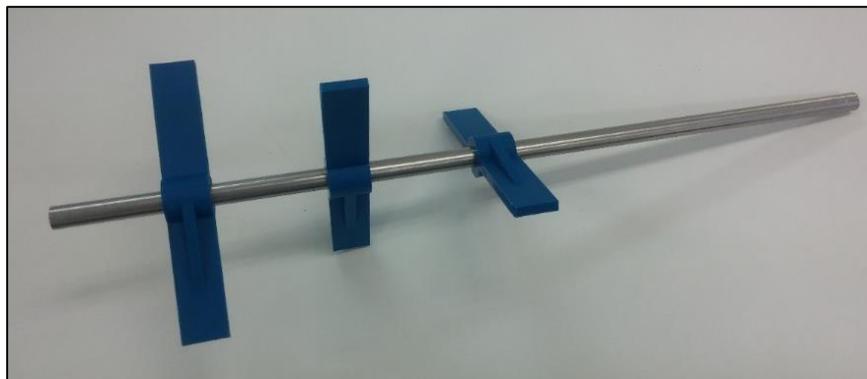


Figura 37. Eje e impulsores de agitador
Fuente: Cortesía de Ing. Juan Moreano

Para el sellado del agitador en la tapa se fabricó un cojinete de teflón y se utilizó sellos de bomba de agua para mantener la hermeticidad del reactor. El cojinete de teflón fue empernado en la tapa del reactor, ver figura 38.



Figura 38. Cojinete para eje de agitador
Fuente: Elaboración propia

Se unieron los ejes del motor y del agitador mediante un acoplamiento rígido, ver figuras 36 y 39. Se construyó una estructura metálica que soporte el reactor y sobre ella se acopló el motor agitador, ver figura 39.



Figura 39. Presentación de motor, eje agitador y reactor
Fuente: Elaboración propia

3.2.1.4 Sistema de ingreso/salida de sustrato y de salida de biogás

El sistema de alimentación fue manual. Se acondicionó una tubería de PVC de 1” en la parte lateral del reactor. La altura de ingreso estaba bajo el nivel del líquido de tal modo que se garantice la sumersión de la nueva materia prima y se evite la salida del biogás acumulado en la cabecera del reactor. Se colocó una válvula de PVC para sellar este ducto después de cada alimentación y evitar el contacto del líquido con aire del ambiente externo. Además se acondicionó un embudo para facilitar esta tarea, ver figura 40.



Figura 40. Vía de ingreso de sustrato
Fuente: Elaboración propia

Para la salida del digestato o biol se instaló una tubería de descarga de 1” en la parte inferior del reactor. Esta descarga funcionaba también como toma-muestra de digestato para los análisis químicos y para medición de nivel de pH y del ratio de alcalinidad.

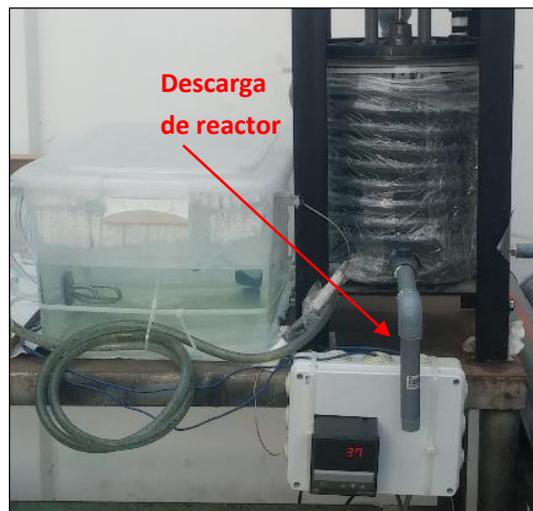


Figura 41. Línea de descarga y punto toma-muestra de digestato de reactor
Fuente: Elaboración propia

En la tapa del reactor se instaló una tubería de PVC de 1" para la salida del biogás, ver figura 42. Mediante un adaptador en "T" se instaló una tubería horizontal con una válvula en cada extremo. Por un extremo el biogás fluye continuamente hacia el sistema de medición. Por el otro extremo de la tubería el biogás es dirigido mediante una válvula hacia un acumulador de biogás.

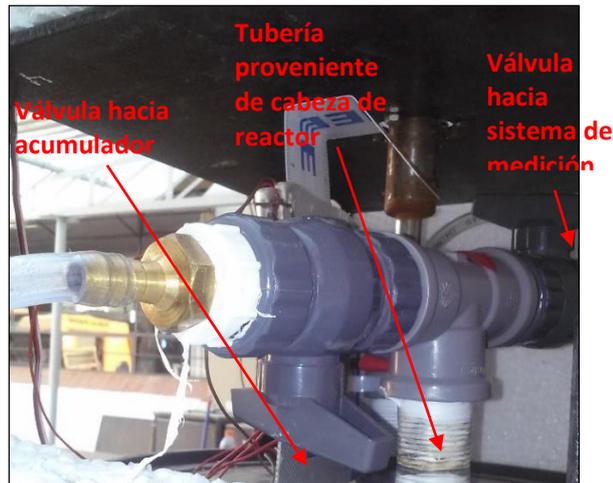


Figura 42. Sistema de salida de biogás
Fuente: Elaboración propia

La válvula del acumulador permanece normalmente cerrada y el gas era dirigido hacia este acumulador únicamente cuando se alimentaba o extraía digestato del reactor. Esto con la finalidad de evitar que ingrese aire al reactor debido a depresiones en el interior del reactor y para evitar mediciones negativas de flujo de biogás. Este sistema de acumulación consistió en una cámara de neumático de bicicleta y una trampa de agua para descarga de la misma, ver figura 43.

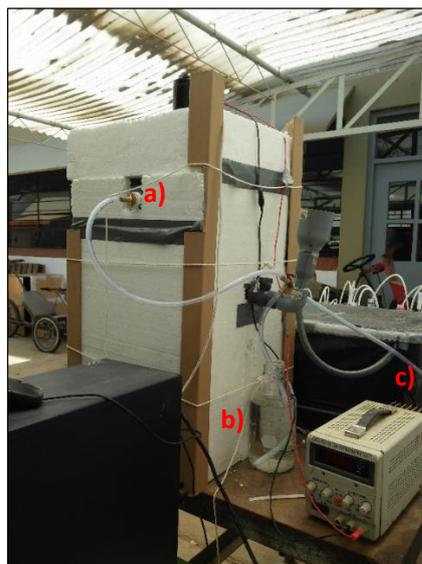


Figura 43. Sistema de acumulación. El biogás se lleva mediante una línea de manguera de 3/16" hacia una bolsa, garantizando la hermeticidad del sistema. a) Válvula y adaptador 1-3/16". b) Trampa de agua para descarga de acumulador. c) Línea hacia cámara neumática.
Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Implementación

La implementación total del reactor semicontinuo se fue dando a medida que se implementaba y se unían los componentes descritos en el apartado 3.2.1. Nótese que hasta aquí la implementación abarca solamente la construcción e instalación de los sistemas y componentes que contendrán los sustratos, y productos de la digestión anaerobia. La puesta en marcha se explicará en el siguiente capítulo. En la figura 44 se presenta el sistema implementado antes de la puesta en marcha.



Figura 44: Reactor continuo antes de la puesta en marcha y antes de instalación de sistema de salida/acumulación de biogás.

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que el agua para la chaqueta del sistema semicontinuo proviene del baño maría de la cámara BMP. Cabe señalar que en la foto se removió el aislamiento del tecnopor para apreciar mejor el sistema.

Capítulo 4:
Parte Experimental

4.1 Ensayo de Potencial Bioquímico de Metano (BMP)

Para la realización de los experimentos se siguió la norma alemana VDI – 4630 [12]. También se usó como referencia los estudios de los doctores Angelidaki [26] y Rozzi [28]. En un proceso de digestión anaerobia la materia prima, que es la materia orgánica, también conocido como sustrato, es degradada y convertida en biogás por acción de los microorganismos anaerobios, o biomasa.

4.1.1 Biomasa o inóculo

Es el conjunto de microorganismos (hidrolíticos, acidogénicos, acetogénicos y metanogénicos) que intervienen en el proceso. Estos microorganismos viven solamente en un medio anaerobio, con pH y temperatura adecuada.

Debido a que no existe otra planta de digestión anaerobia en funcionamiento a nuestro alcance, para obtener el inóculo se tuvo que recurrir a fuentes naturales. En la naturaleza el proceso de digestión anaerobia se da en el sistema digestivo de los rumiantes. Para estos ensayos se obtuvo el inóculo a partir de estiércol fresco de ganado vacuno de la granja de zootecnia de la Universidad Nacional de Piura.

Se tiene que considerar que el inóculo contiene microorganismos anaerobios, así como también materia orgánica. De acuerdo a VDI – 4630, el inóculo debe ser desgasificado. Para ello se lo almacena, durante una semana, a las mismas condiciones de temperatura que va a tener durante el ensayo. Esto con el objetivo de reducir suficientemente su propia producción de biogás, mediante un periodo de hambruna de los organismos. De este modo los microorganismos consumen la mayor cantidad de la materia orgánica contenida en el inóculo [12].

4.1.1.1 Concentración y proporción de inóculo

La norma VDI-4630 indica que la materia orgánica seca (oDM) del inóculo debe ser del 1.5 al 2% de la masa de la solución (sin considerar la masa del sustrato), ecuación 4.1. Esto para estandarizar los estudios y obtener resultados comparables.

$$1.5\% < \frac{oDM_{inóculo}}{Masa\ de\ solución} < 2\%.....(4.1)$$

En la tabla 7 se muestran los datos de DM y ODM del estiércol vacuno utilizado como inóculo.

Tabla 7: Medición de DM y ODM

	Estiércol Vacuno
DM	26.32% (FM)
ODM	88.45% (DM)

Fuente: Elaboración propia

Debido a que se preparó este inóculo para ser utilizado también en el prototipo semicontinuo, el volumen total de la solución de inóculo fue de 20 litros. Para esto

se usó 1.75 kg de estiércol fresco. Con esto se cumple lo indicado en la ecuación 4.1.

$$1.5\% < \frac{1.4kg \times 26.32\% \times 88.45\%}{16kg + 1.4kg} \times 100\% = 1.87\% < 2\%$$

La solución de agua y estiércol (20 litros) fue sometida a un periodo de desgasificación durante una semana, como lo indica VDI-4630. De esta solución se extrajeron 6 volúmenes de 900 ml para cada reactor BMP. Asumiendo que el estiércol fue mezclado de manera uniforme en la solución, la masa de ODM del inóculo en cada reactor BMP fue de 18.3 $g_{ODM_inóc}$.

4.1.1.2 Sustrato o materia prima y proporciones

Se utilizaron 03 residuos orgánicos como materia prima: estiércol vacuno, cáscara de cacao y cáscara de plátano. En la tabla 8 se indican los porcentajes de DM y ODM para estos sustratos.

Tabla 8: Porcentajes de materia seca y materia seca orgánica para sustratos utilizados.

	Estiércol Vacuno	Cáscara de cacao	Cáscara de plátano
DM	26.32% (FM)	19.71%(FM)	14.93%(FM)
ODM	88.45% (DM)	94.77%(DM)	91.69%(DM)

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a las proporciones entre sustrato e inóculo, VDI -4630 sugiere, que para evitar inhibiciones por exceso de sustrato, la materia seca orgánica del sustrato sea a lo mucho el doble de la ODM de la solución de inóculo. Esta relación de proporción entre sustrato e inóculo se representa en la ecuación 4.2.

$$R_{sus/ino} = \frac{masa\ ODM_{sustrato}}{masa\ ODM_{sol.inóculo}} \leq 0.5.....(4.2)$$

Los reactores fueron divididos en 03 parejas, cada pareja fue alimentada con un sustrato diferente. De modo que 02 reactores fueron alimentados con 40 g de estiércol vacuno cada uno, otros 02 reactores con 40g de cáscara de cacao cada uno y la pareja restante con 40g de cáscara de plátano.

4.1.2 Puesta en marcha

En la tabla 9 se resumen los reactores implementados, con el sustrato ingresado y se verifica el cumplimiento de la ecuación 4.2. Recordamos que la masa de ODM de inóculo en cada reactor es de $18.3 g_{ODM_inóc}$.

Tabla 9: Reactores puestos en marcha

Sustrato	DM (%FM) / ODM (%DM)	Reactor	Masa de sustrato (g)	Masa de ODM de sustrato (g_ODM_sust)	$R_{\frac{sus}{ino} \leq 0.5}$
Estiércol	26.32 / 88.45	1	40	9.31	0.5
		2	40		
Cáscara de cacao	19.71 / 94.77	3	40	7.47	0.4
		4	40		
Cáscara de plátano	14.93 / 91.69	5	40	5.48	0.3
		6	40		

Fuente: Elaboración propia

Las cáscaras de cacao y de plátano fueron particuladas en trozos menores a 10mmx10mmx10mm. Esto con el fin de aumentar la superficie de contacto para favorecer la etapa de hidrólisis, como se señala en VDI-4630.



Figura 45. Ambiente acondicionado para instalación de cámara BMP

Fuente: Elaboración propia

La cámara fue colocada en un ambiente exterior bajo techo mostrado en la figura 45. En la figura 46 se puede ver la cámara BMP en funcionamiento, para mostrar los reactores se retiró la cubierta del recipiente. Se puede apreciar las válvulas colocadas para recargar las botellas de desplazamiento.



Figura 46. Ensayo BMP en funcionamiento
Fuente: Elaboración propia.

La lectura de la producción se realizó diariamente durante 15 días. Debido a que la placa del controlador sufrió un corto-circuito por un liqueo. Por esta razón los resultados obtenidos sólo corresponden a 15 días y no a 25 o 30 días como es lo habitual en un ensayo BMP. A pesar de esto se puede llegar a unas primeras conclusiones con respecto a los ensayos realizados.

4.2 Reactor Semicontinuo

4.2.1 Preparación de inóculo y sustrato

Según lo explicado en el apartado 4.1.1.1 de los 20 litros de inóculo sometido al pretratamiento, sólo quedaron 14.6 litros. La masa de ODM para este volumen de inóculo, asumiendo un mezclado uniforme, es de 297 g_{ODM} . A esta solución se le adicionó 2.4 L de agua para completar los 17 litros. Por lo que el nuevo porcentaje de ODM de este inóculo es recalculado.

$$oDM_{inoculo-cont} = \frac{297 g}{14600 g + 2400g} = 1.75\%FM$$

Este dato es muy cercano al obtenido en los análisis químicos realizados (1.78%), detallado en los anexos.

El sustrato utilizado fue la cáscara de cacao particulada en dimensiones menores a 10mmx10mmx10mm.



Figura 47. Cáscara de cacao particulada.

Fuente: Elaboración propia

Con el objetivo de simular el estudio para la cáscara de cacao descartada en las parcelas agrícolas, la cáscara usada en los experimentos provenía de frutos con grado de maduración correspondiente al de cosecha. Por simplificaciones logísticas los frutos fueron transportados por lotes hasta el laboratorio. Allí fueron conservados a temperaturas entre 3-4 °C hasta el momento de alimentar al reactor.

4.2.2 Puesta en marcha y operación

Verificados todos los sistemas y con el inóculo listo se procedió con la puesta en marcha del reactor semicontinuo.

Se comenzó alimentado diariamente el reactor con 50 gramos de cáscara de cacao. Para calcular la tasa de carga orgánica (OLR) usamos la expresión del apartado 2.3.3.3.

$$OLR = \frac{50g_{FM} \times 0.1971 \times 0.9477_{oDM/FM}}{17 \text{ litros} \times \text{día}} = \frac{0.55kg_{oDM}}{m^3 \cdot d}$$

La OLR inicial fue de $0.55kg_{oDM}/m^3/d$, después de la primera semana la OLR fue duplicada.

Una particularidad a destacar en los prototipos implementados (BMP y reactor semicontinuo) es que los dos funcionan con solamente un sistema térmico para mantener la temperatura deseada. Es decir el mismo líquido del baño maría utilizado para mantener la temperatura en la cámara BMP es usado en la chaqueta térmica del prototipo semicontinuo. De esta manera se utilizó menor cantidad de materiales en la implementación de los prototipos.



Figura 48. Prototipo BMP y prototipo semicontinuo funcionando simultáneamente.
Fuente: Elaboración propia

Normalmente la operación de un reactor no requiere de mucha supervisión. Sin embargo debido a que este es reactor es un prototipo requería supervisión para descartar fugas de gas, liqueos, o algún otro imprevisto. Además debido a que la alimentación y el monitoreo de ciertos parámetros como pH, ratio de alcalinidad se realizaban de manera manual, entonces se requería la extracción diaria de una muestra de digestato.

Diariamente se extrae una muestra de digestato de 500 ml aproximadamente, para luego realizar las mediciones correspondientes de pH y ratio de alcalinidad, y posteriormente se diluye en ésta la cáscara particulada con lo que se alimenta el reactor. De esta manera se facilita el flujo de la cáscara de cacao a través del ducto de alimentación.



Figura 49. Alimentación diaria de reactor continuo
Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Monitoreo de parámetros

4.2.3.1 Monitoreo de nivel de pH

La medición manual del nivel de pH se realizó mediante la extracción de una muestra de digestato.



Figura 50. Extracción de muestra de digestato para medición de pH
Fuente: Elaboración propia

Para realizar las mediciones se utilizó un electrodo y trasmisor de la marca Hanna Instruments.



Figura 51. Instrumentos usados para la medición de pH del digestato. Electrodo modelo HI-1006-3205 y trasmisor HI-8510E de la marca Hanna Instruments.
Fuente: Elaboración propia.

Estos elementos fueron debidamente calibrados antes de realizar los experimentos, además iniciadas las mediciones fueron calibrados semanalmente.



Figura 52. Medición manual del nivel de pH
Fuente: Elaboración propia

4.2.3.2 Monitoreo de ratio de alcalinidad

El ratio de alcalinidad ha sido determinado según la relación FOS/TAC explicada en el apartado 2.3.2.2. Se realizó una titulación manual para determinar la concentración de los ácidos grasos volátiles (VFA o FOS) y de la capacidad buffer del sistema (TAC) , según lo explicado en [13].

$$\frac{FOS}{TAC} = \frac{(1.66 * B - 0.15) * 500 [mg/LHAc]}{250 * A [mgCaCO_3/L]}$$

donde:

A: Volumen de ácido añadido desde el original hasta pH 5.0 en ml

B: Volumen de ácido añadido desde pH 5.0 hasta pH 4.4 en ml

La titulación es llevada a cabo en 20 ml de muestra de digestato filtrada o centrifugada, usando una solución de ácido sulfúrico con una concentración de 0.05 mol/l. El parámetro A es el volumen del ácido sulfúrico añadido a la muestra de 20 ml de digestato desde su pH original hasta pH 5.0. El parámetro B es el volumen del ácido sulfúrico añadido a la muestra desde el pH 5.0 hasta el pH 4.4

Breve descripción de titulación manual

La muestra de 20 ml es vertida en un vaso precipitado, como se muestra en la figura 53.

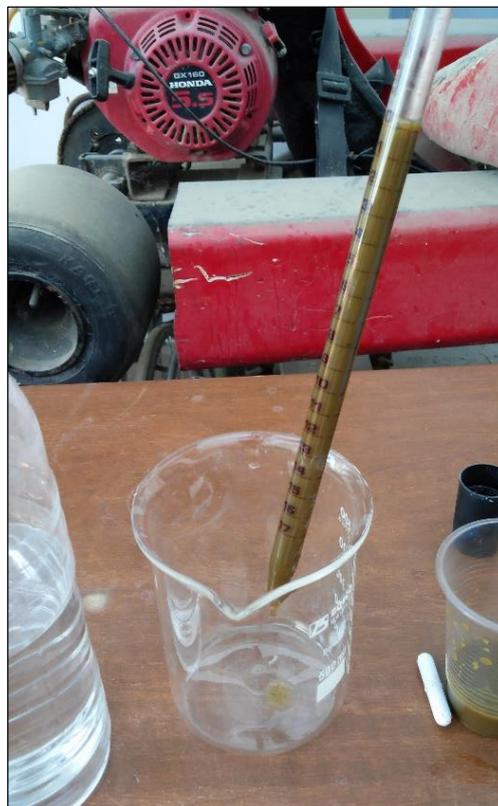


Figura 53. Toma de muestra de 20 ml de digestato para titulación
Fuente: Elaboración propia

La muestra se pone en permanente agitación utilizando un agitador magnético como se muestra en la figura 54.

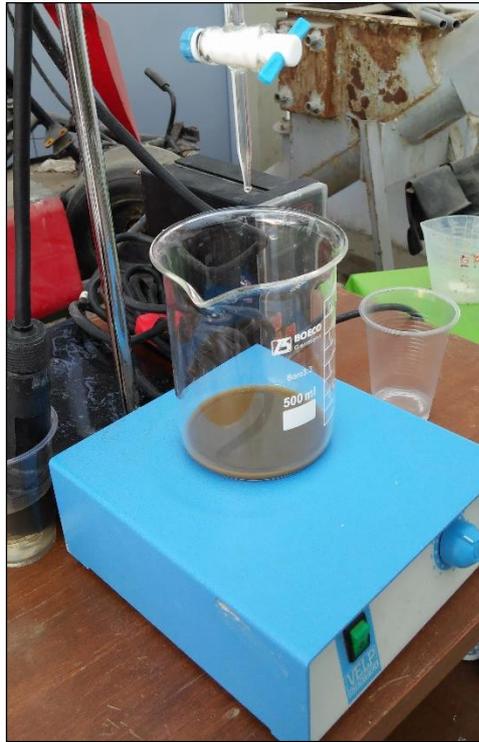


Figura 54. Muestra de digestato en agitación para realización de titulación manual
Fuente: Elaboración propia

El monitoreo del descenso del pH se realizó con el equipo descrito en el apartado 4.2.3.1.



Figura 55. Monitoreo de descenso del nivel de pH en titulación manual
Fuente: Elaboración propia

La adición del ácido sulfúrico se realizó mediante una bureta milimetrada de 40 ml y de válvula manual, que se puede apreciar en las figuras 54, 55 y 56. Cabe mencionar que el cambio de pH no es lineal con el volumen de ácido sulfúrico añadido y que además los cambios de pH se dan de manera muy lenta, por tanto la adición del ácido sulfúrico se debe realizar de manera lenta, esperando que las gotas de ácido sean totalmente mezcladas en la muestra de digestato. Esta medición se realizó cada dos días.



Figura 56. Titulación manual para determinación de ratio de alcalinidad
Fuente: Elaboración propia

4.2.3.3 Monitoreo de carga orgánica

Estas mediciones nos indican en qué grado el sustrato está siendo descompuesto por el proceso de digestión anaerobia. Mediante análisis gravimétrico se mide el porcentaje de materia orgánica seca (ODM). Recordemos que sólo la materia orgánica seca contenida en el sustrato tiene la posibilidad de ser convertida en biogás. Por tanto, la alta presencia o incremento de este parámetro es un indicador de que el proceso no se está desarrollando adecuadamente.

4.2.3.4 Monitoreo de temperatura

La temperatura en el interior del reactor fue medida indirectamente. Mediante una primera prueba se determinó que la diferencia entre la temperatura del agua de la cámara BMP y el líquido en el reactor semicontinuo era de 1°C. Por tanto, para una temperatura controlada en la cámara BMP de 38 °C, se establecía una temperatura de 37 °C en el digestato del reactor. Ambas temperaturas están dentro del rango mesofílico y además cumplían el requisito de no presentar variaciones, pues se utilizaba el sistema de control descrito en el apartado 3.1.2.3.

4.2.3.5 Monitoreo de producción de biogás

Por el bajo nivel de producción de biogás de este reactor, no se utilizó un sensor comercial para la medición del flujo de manera *online*. Debido a esto se implementó un sistema de medición de volumen por desplazamiento de líquido similar al descrito en el apartado 3.1.2.4.c.

Capítulo 5:
Presentación de resultados

5.1 Resultados de ensayo BMP

Como se explicó en el apartado 4.1.1.2 se sometieron a ensayos 03 tipos de sustratos: estiércol vacuno, cáscara de plátano y cáscara de cacao. Se realizaron mediciones de la producción de biogás y de la concentración de metano usando las técnicas descritas en los apartados 4.1.1.2.

5.1.1 Producción de biogás

En la tabla 10 se presentan las producciones de biogás a partir de 40 gramos de cada sustrato. Debemos tener en cuenta que estos son los primeros datos que se obtienen al hacer las mediciones *in situ* a la temperatura y presión atmosférica ambiente.

Tabla 10. Producción diaria y acumulada de biogás a partir de 40 g de sustrato

Parámetro	Sustrato	Día											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Producción diaria de biogás (ml)	Cáscara de cacao	341	212	275	267	280	132	78	59	50	56	68	47
	Cáscara de plátano	345	446	444	364	427	183	126	89	53	71	81	38
	Estiércol vacuno	102	68	78	86	37	14	0	0	0	27	53	33
Producción acumulada de biogás (ml)	Cáscara de cacao	593	805	1080	1347	1627	1759	1837	1896	1946	2002	2070	2117
	Cáscara de plátano	575	1021	1465	1829	2256	2439	2565	2654	2707	2778	2859	2897
	Estiércol vacuno	332	400	478	564	601	615	615	615	615	642	695	728

Fuente: Elaboración propia

Las producciones de volumen a presión y temperatura ambiente no son comparables, por tanto deben ser expresadas en volumen en condiciones normales, tal como se explica en el apartado 3.1.2.4. En la tabla 11 se presentan las producciones de biogás en condiciones normales a partir de 40 gramos de sustrato.

Tabla 11. Producciones diaria y acumulada de biogás normal a partir de 40 g de sustrato

Parámetro	Sustrato	Día											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Producción diaria de biogás (ml-N)	Cáscara de cacao	286.1	184.9	231.2	231.5	238.0	113.3	65.0	49.9	43.3	48.2	57.7	39.5
	Cáscara de plátano	345	446	444	364	427	183	126	89	53	71	81	38
	Estiércol vacuno	102	68	78	86	37	14	0	0	0	27	53	33
Producción acumulada de biogás (ml-N)	Cáscara de cacao	593	805	1080	1347	1627	1759	1837	1896	1946	2002	2070	2117
	Cáscara de plátano	575	1021	1465	1829	2256	2439	2565	2654	2707	2778	2859	2897
	Estiércol vacuno	332	400	478	564	601	615	615	615	615	642	695	728

Fuente: Elaboración propia

En las figuras 57 y 58 se comparan las producciones normales de biogás tanto diarias como acumuladas.

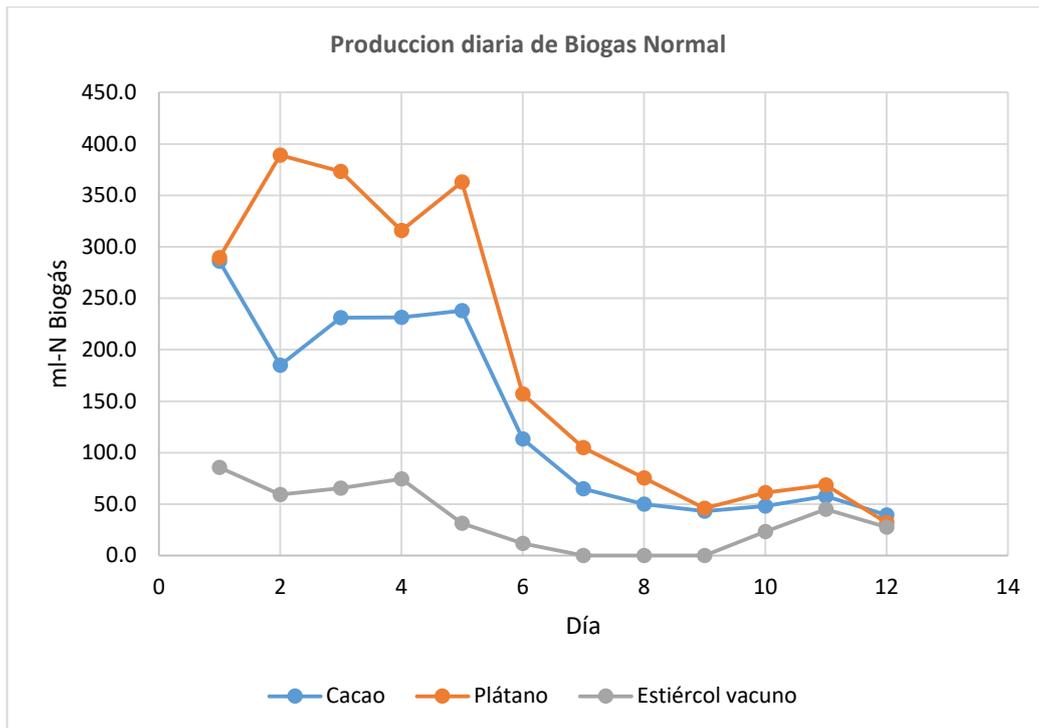


Figura 57. Producción diaria de biogás normal a partir de 40 gramos de sustrato.
Fuente: Elaboración propia.

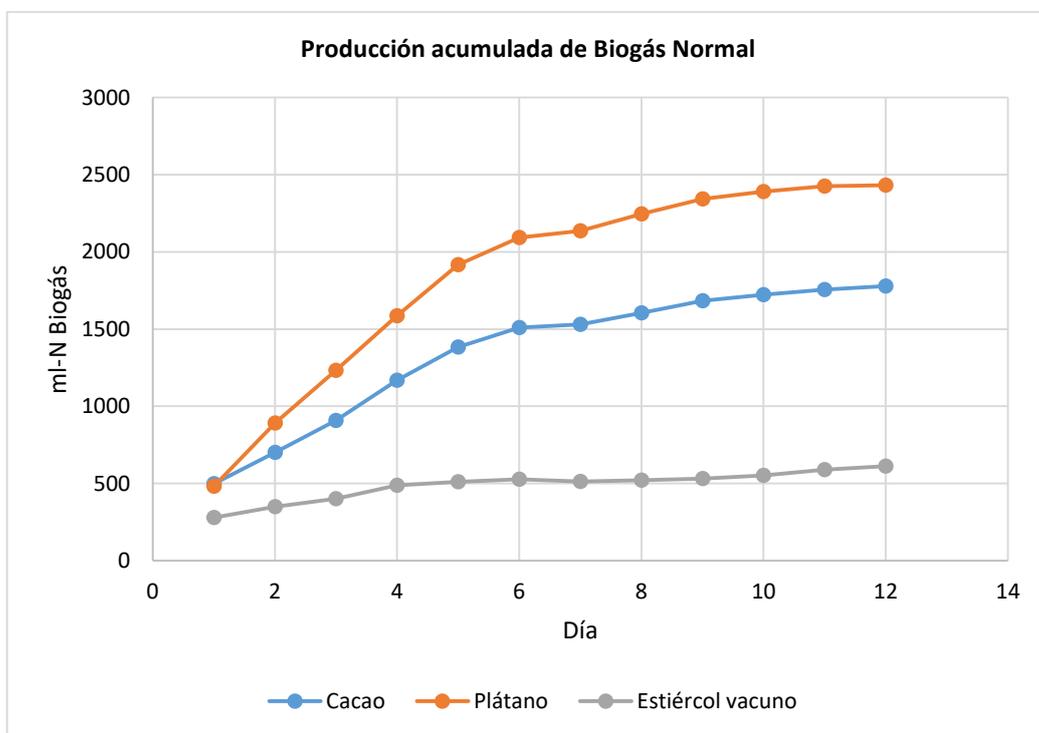


Figura 58. Producción acumulada de biogás normal a partir de 40 gramos de sustrato.
Fuente: Elaboración propia

Ya conocemos el volumen normal de biogás que se produce a partir de 40 gramos de los sustratos utilizados. Ahora vamos a comparar las producciones específicas de biogás de la cáscara de cacao, cáscara de plátano y estiércol vacuno con respecto a la materia seca orgánica (ODM) de cada uno de ellos respectivamente, ver tabla 9. Para esto dividimos los volúmenes normales producidos por el ODM de cada sustrato y obtenemos los valores presentados en la tabla 12.

Tabla 12: Producción específica de biogás normal para cada sustrato

Parámetro	Sustrato	Día											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Producción diaria de biogás (l Biogás-N/kg ODM)	Cáscara de cacao	38.3	24.7	30.9	31.0	31.9	15.2	8.7	6.7	5.8	6.5	7.7	5.3
	Cáscara de plátano	52.9	71.0	68.2	57.6	66.3	28.7	19.2	13.8	8.4	11.2	12.5	5.8
	Estiércol vacuno	9.2	6.4	7.0	8.0	3.4	1.3	0.0	0.0	0.0	2.5	4.8	3.0
Producción acumulada de biogás (l Biogás-N/kg ODM)	Cáscara de cacao	38.3	63.0	94.0	125.0	156.8	172.0	180.7	187.4	193.2	199.6	207.3	212.6
	Cáscara de plátano	52.9	123.9	192.0	249.7	316.0	344.6	363.8	377.6	385.9	397.1	409.6	415.5
	Estiércol vacuno	9.2	15.6	22.6	30.6	34.0	35.3	35.3	35.3	35.3	37.8	42.6	45.6

Fuente: Elaboración propia

Es esta producción específica la que nos permite hacer comparaciones válidas entre las producciones de biogás de diferentes sustratos. En las figuras 59 y 60 se hacen las comparaciones.

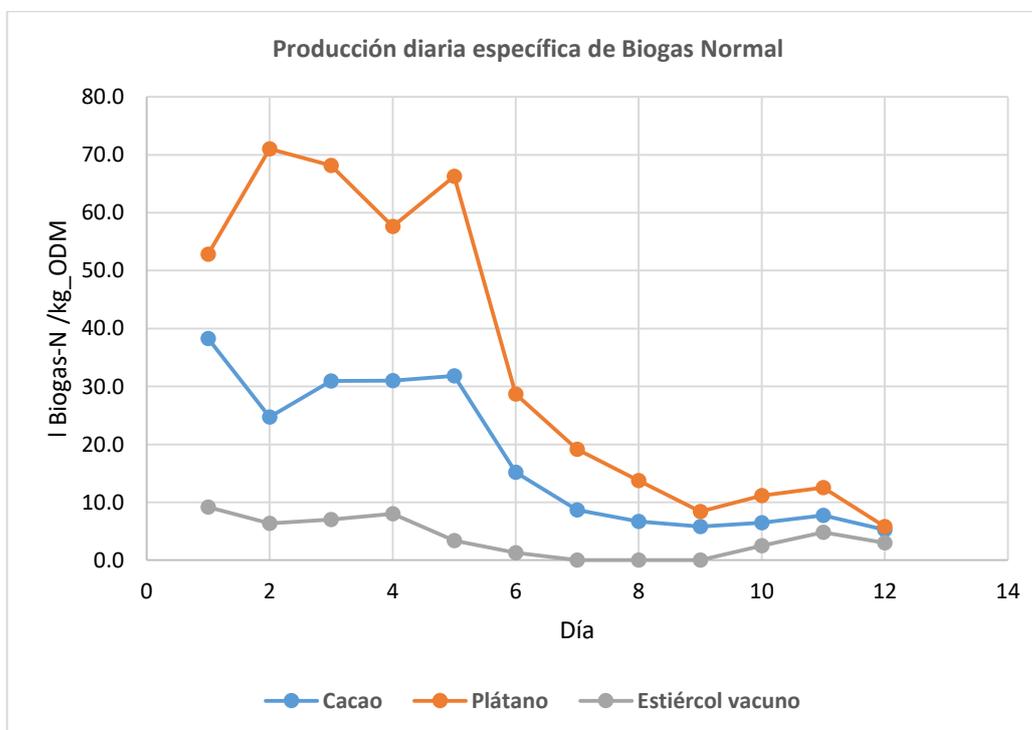


Figura 59. Producción específica por día de biogás normal

Fuente: Elaboración propia.

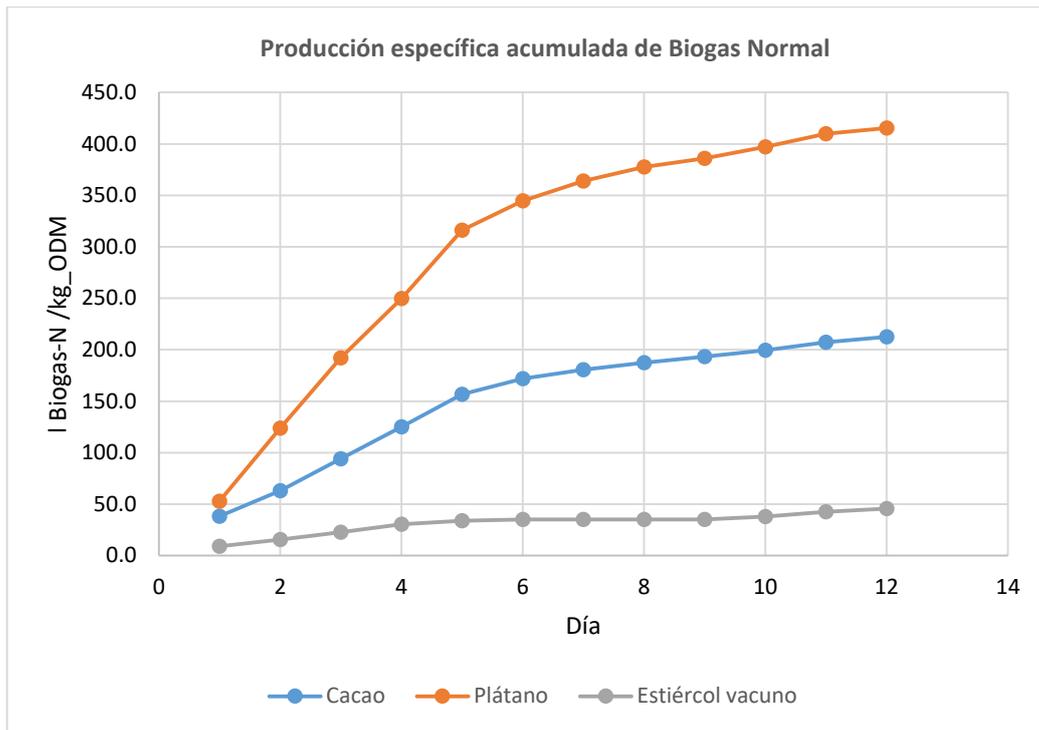


Figura 60. Producción específica acumulada de biogás normal
Fuente: Elaboración propia

Como se corrobora en las figuras, desde 57 hasta 60, la producción de biogás es mayor cuando se utiliza la cáscara de plátano como sustrato, seguido por la cáscara de cacao y finalmente el estiércol vacuno.

5.1.2 Potencial bioquímico de metano (BMP)

Si bien la alta producción de biogás a partir de un sustrato es un buen indicador, se tiene que verificar la cantidad de metano producido, ya que puede variar con respecto a la composición de cada sustrato. Y es el metano uno de los productos principales que se buscan obtener y maximizar a partir del proceso de digestión anaerobia, ya que nos va a servir como combustible o fuente de energía.

En primer lugar observaremos las producciones diaria y acumulada de metano normal a partir de los 40 gramos de sustrato utilizado en cada ensayo, ver tabla 13. Y las comparaciones gráficas se presentan en las figuras 61 y 62.

Tabla 13. Producciones diaria y acumulada de metano a partir de 40 gramos de sustrato

Parámetro	Sustrato	Día											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Producción diaria de metano (ml CH ₄ -N)	Cascara de cacao	238.3	106.4	105.9	106.7	125.0	63.5	43.3	37.3	17.3	38.7	45.0	22.7
	Cáscara de plátano	218.2	161.3	163.1	167.4	231.2	103.0	71.7	50.0	13.8	46.5	58.5	20.2
	Estiércol vacuno	71.3	32.3	50.4	54.6	40.0	42.9	24.2	26.2	15.6	36.2	28.0	32.8
Producción acumulada de metano (ml CH ₄ -N)	Cascara de cacao	238.3	344.7	450.6	557.3	682.3	745.8	789.1	826.3	843.6	882.4	927.3	950.0
	Cáscara de plátano	218.2	379.5	542.6	710.0	941.2	1044.2	1115.8	1165.8	1179.6	1226.1	1284.6	1304.8
	Estiércol vacuno	71.3	103.6	154.0	208.7	248.6	291.53	315.7	341.9	357.5	393.7	421.7	454.4

Fuente: Elaboración propia.

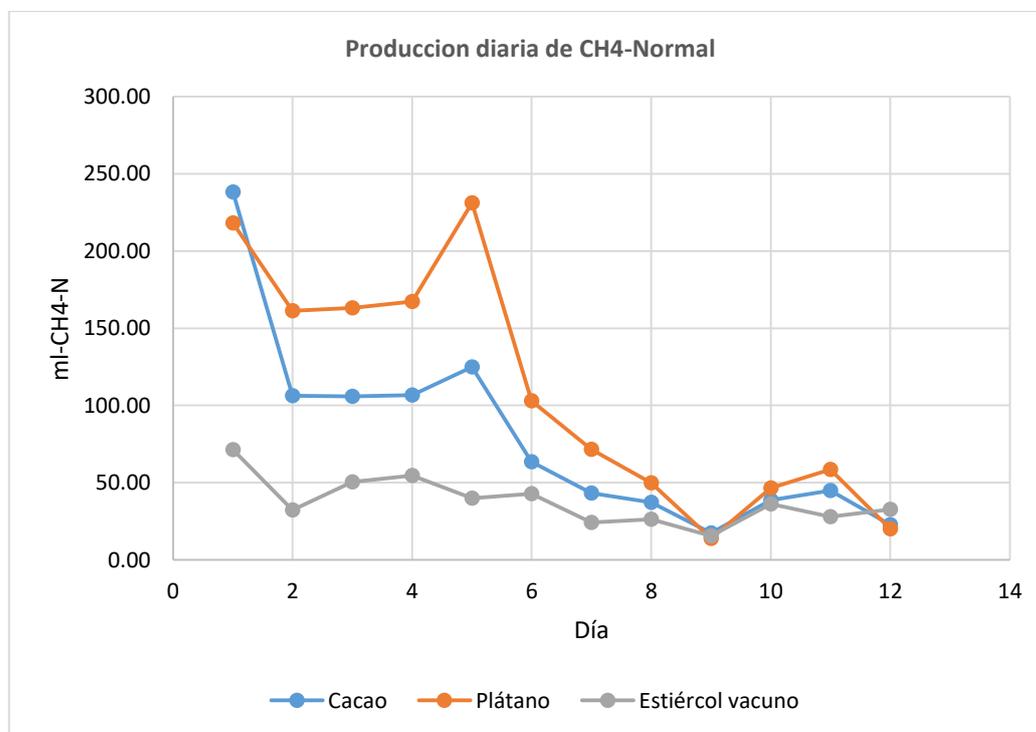


Figura 61. Volumen de biogás diario en condiciones normales de presión y temperatura
Fuente: Fuente: Elaboración propia.

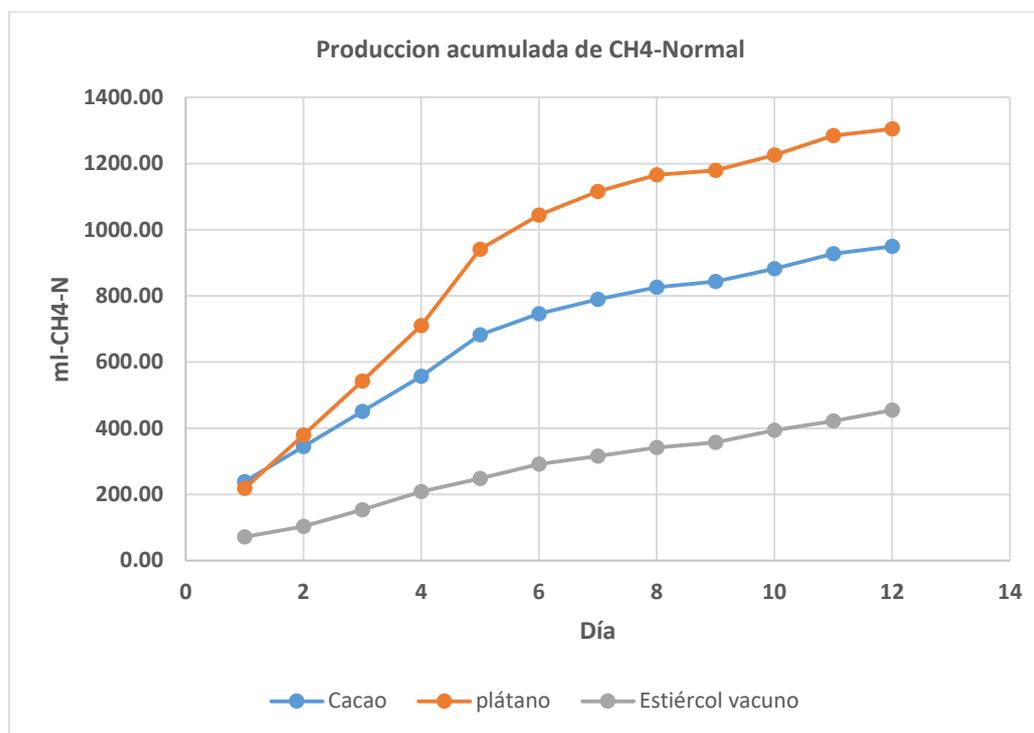


Figura 62. Producción acumulada de metano en condiciones normales de presión y temperatura
Fuente: Elaboración propia.

El potencial bioquímico de metano (BMP) es la producción específica acumulada de metano con respecto a la masa de materia orgánica seca (ODM) de un determinado sustrato. Para obtener el BMP de un sustrato dividimos su producción de metano normal por la masa de materia seca orgánica, ver tabla 9. En la tabla 14 se presentan las producciones de metano para cada sustrato.

Tabla 14. Producciones de metano a partir de cáscara de cacao, cáscara de plátano y estiércol vacuno

Parámetro	Sustrato	Día											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Producción diaria de metano (l CH4-N/kg ODM)	Cáscara de cacao	32.0	14.2	14.2	14.3	16.7	8.5	5.8	5.0	2.3	5.2	6.1	3.0
	Cáscara de plátano	39.8	29.5	29.8	30.5	42.2	18.8	13.1	9.1	2.5	8.5	10.7	3.7
	Estiércol vacuno	7.7	3.5	5.4	5.9	4.3	4.6	2.6	2.8	1.7	3.9	3.0	3.5
Producción acumulada de metano (l CH4-N/kg ODM)	Cáscara de cacao	31.9	46.1	60.3	74.6	91.3	99.8	105.6	110.6	112.9	118.1	124.1	127.1
	Cáscara de plátano	31.9	61.3	91.1	121.7	163.9	182.7	195.8	204.9	207.5	215.9	226.6	230.3
	Estiércol vacuno	31.9	35.4	40.8	46.6	50.9	55.5	58.1	61.0	62.6	66.5	69.5	73.0

Fuente: Elaboración propia

En la figura 63 se muestra la producción diaria de metano normal y en la figura 64 se comparan las curvas BMP para cada uno de los sustratos utilizados en el ensayo.

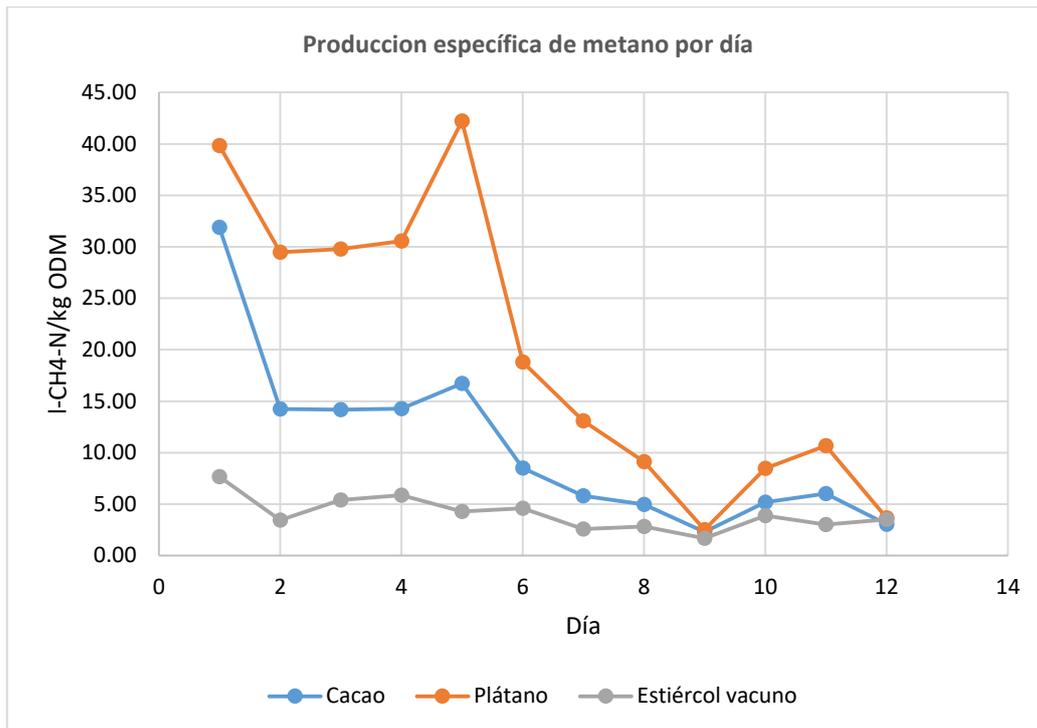


Figura 63. Producción específica de metano
Fuente: Elaboración propia.

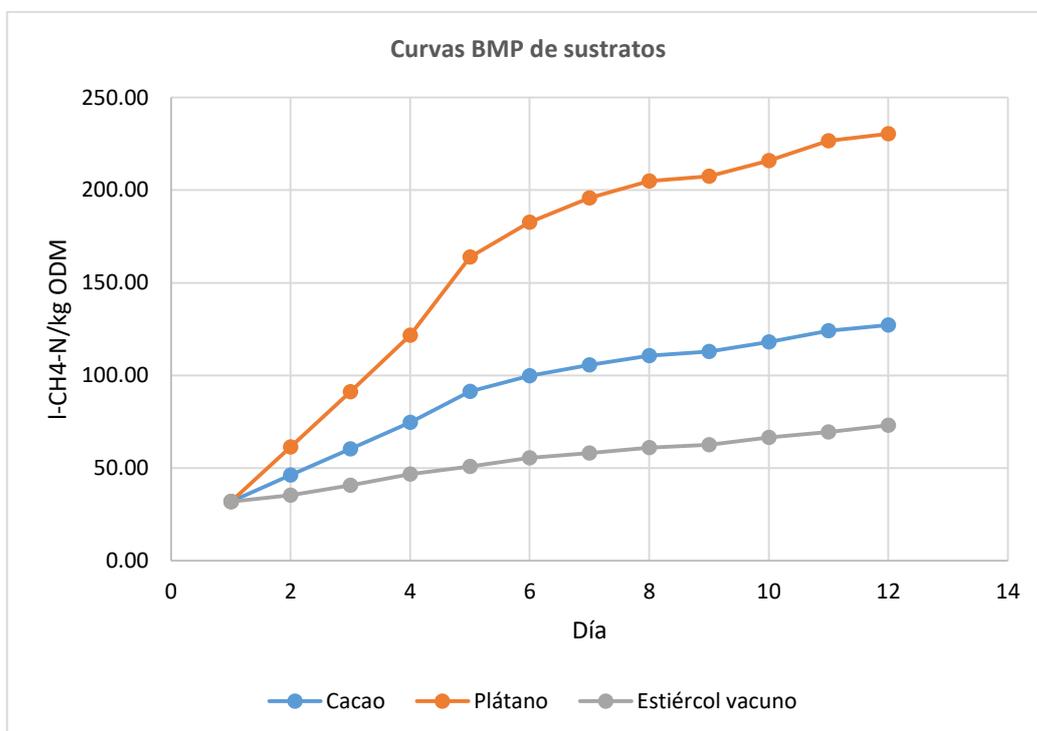


Figura 64. Curvas BMP para a cáscara de cacao, cáscara de plátano y estiércol vacuno
Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en las figuras, el potencial bioquímico de metano es mayor para la cáscara de plátano, seguido del BMP para la cáscara de cacao y finalmente el estiércol vacuno.

5.1.3 Concentración de metano

Para los ensayos implementados, se está asumiendo que el biogás está compuesto solamente por metano y dióxido de carbono. Debido a que la concentración de metano se midió indirectamente, tal como se describe en el apartado 3.1.2.4.d, no es factible comparar las concentraciones de metano de las producciones diarias, porque tanto el biogás y el metano provienen de distintos reactores. En vez de esto se comparan las concentraciones de metano en las producciones acumuladas de cada sustrato, esto se presenta en la figura 65.

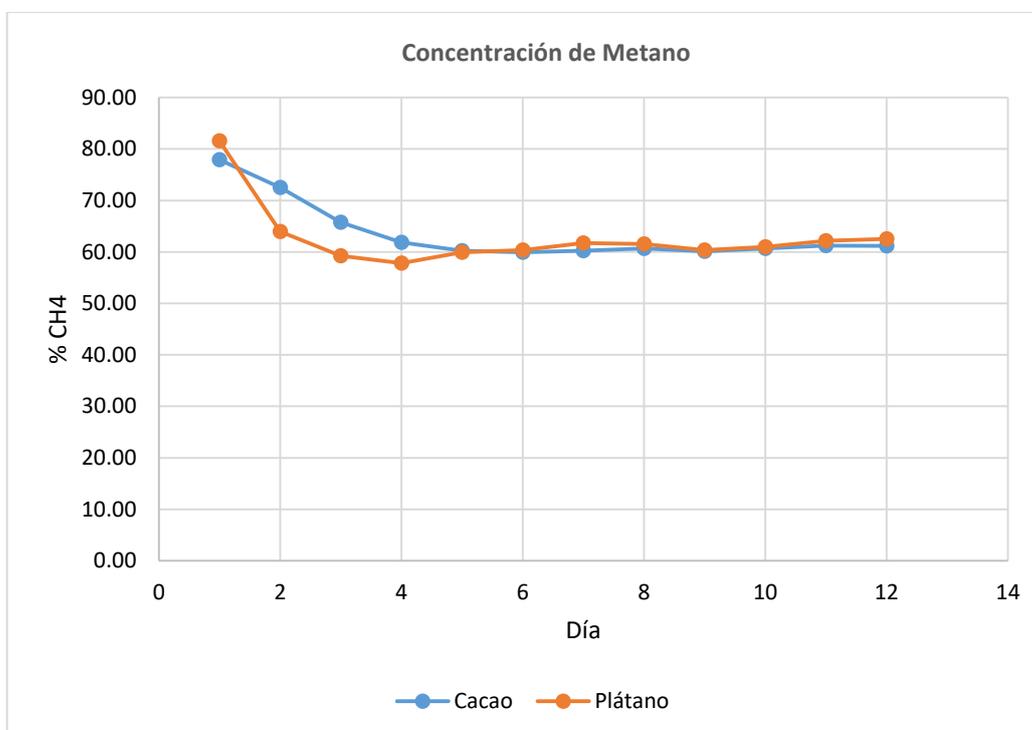


Figura 65. Concentración de metano en biogás producido a partir de cáscara de cacao y cáscara de plátano.

Fuente: Elaboración propia.

Ambas concentraciones son muy similares en el acumulado, sin embargo, al inicio del proceso la concentración es mayor en el biogás producido a partir de la cáscara de cacao.

Cabe señalar que debido a que la medición de la producción de metano se realizó en el biogás húmedo se aplicó el factor de corrección por presión de vapor como se describe en la norma VDI-4630 [12].

5.2 Parámetros de reactor semicontinuo

Los parámetros del proceso de digestión anaerobia que se midieron en el reactor semicontinuo fueron el nivel de pH y el ratio de alcalinidad. Ambas mediciones se realizaron de manera manual con los equipos debidamente calibrados y siguiendo los procedimientos recomendados tanto por el fabricante de los instrumentos así como por parte de la bibliografía disponible [13].

5.2.1 Nivel de pH

Durante los 15 días de operación del prototipo se realizó la medición diaria del nivel de pH, usando el electrodo modelo HI-1006-3205 y el transmitter HI-8510E de la marca Hanna Instruments. En la figura 66 se muestran los datos obtenidos.

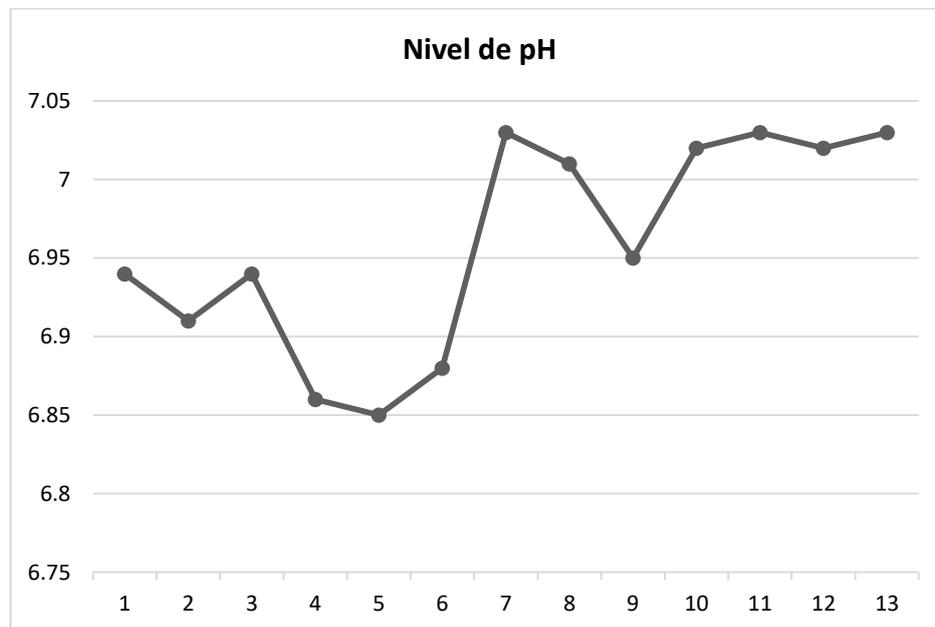


Figura 66. Nivel de pH en reactor semicontinuo.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar el nivel de pH está dentro del rango óptimo para cultivos mixtos, es decir entre 6.8 y 7.5 según [5].

5.2.2 Ratio de Alcalinidad

Este parámetro fue medido cada dos días. Como se explicó en el apartado 4.2.3.2 se realizó la medición mediante titulación manual. En la figura 67 se aprecian los datos obtenidos.

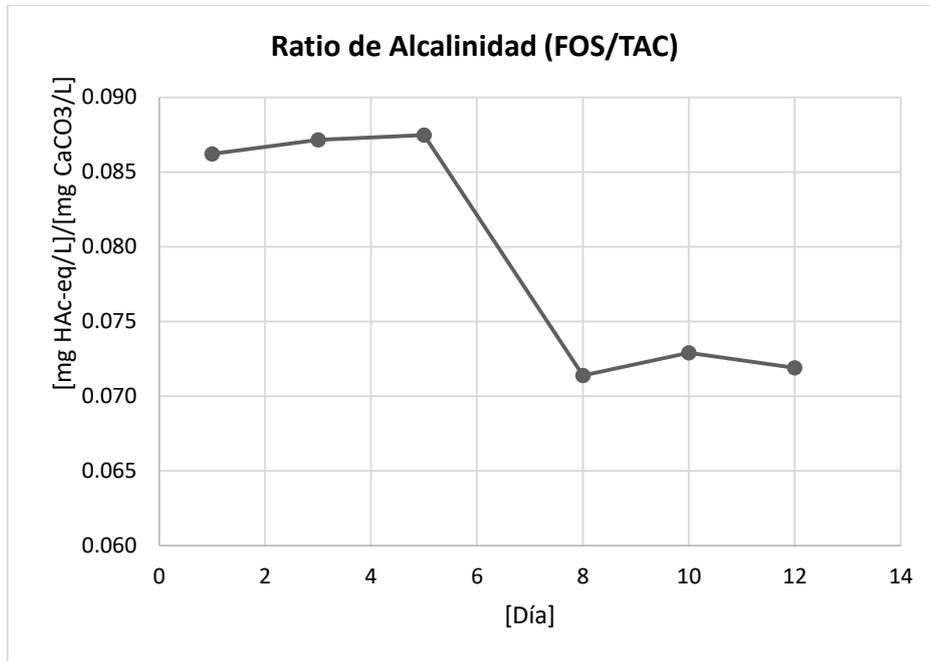


Figura 67: Mediciones diarias de ratio de alcalinidad.

Fuente: Elaboración propia.

El valor óptimo del ratio de alcalinidad depende de cada reactor, ya que está tiene una fuerte dependencia de las características del sustrato. Así que el valor FOS/TAC de un reactor no es comparable con el de otro reactor. Sin embargo, para tener una primera idea, según las reglas empíricas del Instituto Deula Nienburg (ver tabla 6), podríamos decir que el reactor está subalimentado.

Conclusiones

Implementación de Sistema BMP

La cámara temperada por baño maría que se ha implementado (que se puede ver en las figuras 44, 46 y 48) satisface las condiciones exigidas por las normas técnicas como la VDI-4630, además es una opción económica. Sin embargo pueden existir mejoras como por ejemplo incluir agitadores para uniformizar la temperatura del agua. Además el agua utilizada debe ser preferentemente agua destilada para evitar la formación de hongos y suciedad que degraden o reduzcan el performance y aumenten la frecuencia de mantenimiento del sistema.

Si bien se han evaluado tres tipos de sustratos, es beneficioso hacer repeticiones de los ensayos en paralelo para obtener datos más fiables. Esto requiere un mayor número de reactores y por lo tanto un mayor tamaño de la cámara temperada. Una fabricación en acrílico, como la presentada en los equipos comerciales, es una opción económica y que a la vez proporciona buen aislamiento térmico por su baja conductividad térmica.

La parte delicada del sistema son las conexiones de mangueras para la circulación del gas, pues deben ser muy bien selladas para evitar fugas del gas producido. Se recomienda la inclusión de válvulas para la recarga del líquido de barrera.

Debido a que se trabaja con líquidos el sistema eléctrico y de control debe estar ubicado en una posición correcta o tener protección contra salpicaduras para evitar fallas por corto circuito.

Un elemento muy importante en la implementación de los ensayos BMP, así como el prototipo semicontinuo, es el inóculo que se va a utilizar para iniciar los procesos de digestión anaerobia. La solución más fácil es obtener el inóculo de microorganismos anaerobios desde otro reactor operativo, evitando cambios bruscos de temperatura y exposiciones a oxígeno. En el peor de los casos, si no se cuenta con una planta operativa se tendrá que obtener el inóculo a partir de una fuente natural como por ejemplo estiércol vacuno fresco. En este último caso se debe crear las condiciones de temperatura y pH para que se produzca la proliferación y recuperación de los microorganismos anaerobios. Independientemente de la fuente del inóculo se le debe someter a una etapa de desgasificación de aproximadamente dos semanas en el cual los microorganismos degradan los últimos restos de materia orgánica que contengan y así evitar falsas mediciones de producción de biogás a partir del sustrato que se desea evaluar.

Resultados de ensayos BMP

El potencial bioquímico de metano es mayor en el ensayo con cáscara de plátano que en los demás sustratos, esto debido probablemente a la composición química de la cáscara de plátano. Según [29] el porcentaje de carbohidratos en la cáscara de plátano es 4.5 veces que en la cáscara de cacao (variedad CCN-51 [30]). Cabe también mencionar que el porcentaje de lignina en la cáscara de cacao es ligeramente mayor que en la cáscara de plátano: 10.8% y desde 6.4 a 9.6% respectivamente, ver [30] y [31]. Aunque esto no puede ser categóricamente afirmado, porque solo se ha realizado un ensayo, es una primera conclusión que será confirmada con la repetición de los ensayos BMP.

La concentración de metano hasta el quinto día del ensayo es mayor cuando el sustrato es cáscara de cacao, y se vuelven muy similares después del quinto día según los resultados presentados en la figura 65. Sin embargo la producción total de metano es mayor para el sustrato de cáscara de cacao, pues éste produjo la mayor cantidad de biogás. Igual que en el caso anterior, la realización de un mayor número de experimentos corroborará los resultados.

Se concluye finalmente que la utilización de residuos agrícolas (cáscara de cacao o cáscara de plátano) en reemplazo de estiércol vacuno como sustrato aumenta la producción de metano. En estos primeros experimentos, de acuerdo con la figura 64, podemos decir que usando cáscara de cacao en reemplazo de estiércol vacuno la producción tiene un aumento del 74% y usando como reemplazo cáscara de plátano, la producción experimenta un incremento del 215%. Es decir, la producción de metano a partir de la cáscara de plátano es prácticamente el doble que la producción a partir de cáscara de cacao. Esto se tendrá que corroborar con la futura realización de más ensayos.

Implementación de Reactor Semicontinuo

Si bien el prototipo implementado permitió realizar este primer ensayo y satisfizo algunos requerimientos como instalación y conexión de tuberías para el ingreso de sustrato y salida de gas, también presentó ciertas desventajas sobre todo en la hermeticidad del balde seleccionado como tanque. Esto debido a que su sistema de sellado no es suficiente para sellar el gas almacenado en la parte superior. Además su textura flexible permite que se produzcan luces entre las conexiones debido a acumulación del biogás o el movimiento del sistema de remoción, generando fugas de líquido y gas. Existen tanques del mismo material (HDPE), pero de mayor espesor y mejor sellado, que también podrían ser una opción rentable. La utilización de reactores de acero inoxidable, como los distribuidos comercialmente, es una mejor opción, sin embargo implica un mayor costo de material y de fabricación.

El sistema de agitación es una parte muy importante debido a que el prototipo está destinado a ensayos con residuos agrícolas, los cuales son sólidos particulados y que por lo tanto requieren un mayor mezclado en el medio microbiano para facilitar su degradación. El rango de revoluciones del motor agitador deber estar por encima de los 30 RPM de tal manera que se puedan hacer pruebas y determinar el mejor patrón de remoción.

La naturaleza sólida de los sustratos agrícolas implica que las tuberías de alimentación del reactor tengan un diámetro suficiente y sobre todo no sean curvas para evitar congestionamientos.

Los equipos comerciales para medir microflujos de gas, como el obtenido en el prototipo (10 litros de biogás por día) son muy sofisticados y costosos. Una solución es aumentar el volumen del reactor, de esta manera la producción de biogás aumentará y por tanto también el rango de medición del sensor, reduciéndose los costos. Los esfuerzos en la implementación de un prototipo deben ser puestos en el monitoreo tanto de este parámetro como en el monitoreo de la concentración de metano, pues aunque no proporcionen información antes de una estabilidad en el proceso, nos dan la información que más nos interesa conocer: los niveles de producción.

Si bien tener un único sistema térmico para ambos prototipos, cámara BMP y reactor semicontinuo, es una opción rentable, la falla del sistema térmico implica el colapso de ambos ensayos. Una solución es tener un sistema térmico independiente para cada prototipo, esto aumenta el costo de inversión, pero aumenta la confiabilidad de los sistemas.

Monitoreo de parámetros de reactor semicontinuo

De acuerdo a las mediciones presentadas en la figura 61, el nivel de pH se mantuvo dentro de los rangos óptimos, según [5]. A partir del sétimo día se aprecia un incremento en el nivel de pH. Esto puede deberse a que a partir de ese día se duplicó la tasa de carga orgánica de 0.55 a 1.1 $kg_{ODM}/m^3/d$. Sin embargo es un poco contradictorio que el pH incremente cuando se aumenta la tasa de carga orgánica, según lo visto en el apartado 2.3.1.2. Una teoría es que se haya producido este fenómeno debido a la alta presencia de óxido de potasio en la cáscara de cacao [32], que al reaccionar con el agua forma hidróxido de potasio, el cual es un componente básico. Frente a esto se necesitan hacer más experimentos para corroborar estas teorías.

La determinación del parámetro óptimo del ratio de alcalinidad, es decir cuando la producción de metano sea mayor, se conseguirá mediante un monitoreo prolongado del mismo. Sin embargo existen reglas empíricas, como las proporcionadas por el Instituto Deula Nienburg (ver tabla 6), que nos pueden dar una primera idea de la situación del proceso de digestión anaerobia en el prototipo implementado. Según estas reglas empíricas los valores FOS/TAC normales en un reactor deben oscilar entre 0.3 y 0.4.

De acuerdo a estas reglas el reactor implementado estaría subalimentado, por tanto la producción de biogás podría ser mayor a los 10 l/d que fueron medidos. Sin embargo, según la figura 67 el ratio de alcalinidad disminuye a partir del séptimo día cuando se duplica la tasa de carga orgánica. Una disminución del ratio de alcalinidad implica un aumento de la capacidad buffer del sistema, lo cual coincide con la teoría de que la alcalinidad del medio se ve afectada por la liberación del óxido de potasio presente en la cáscara de cacao. Como se mencionó anteriormente, solo con la realización de los experimentos se podrá llegar a conclusiones más precisas respecto a este tema.

Se determinó que la producción de biogás durante el estacionario del proceso, a una tasa orgánica de $0.55 \text{ kg}_{ODM}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ y en condiciones de presión y temperatura ambiente fue de 10 l/día. Esto en condiciones normales equivale a 364 ml-N/h de biogás. La máxima producción de biogás en el ensayo BMP para la cáscara de cacao se da entre el primer y segundo día, llegando a un promedio de 9.8 ml-N/h de biogás, ver figura 61. Si el volumen del reactor BMP se aumentase hasta el volumen del reactor semicontinuo, por proporcionalidad, la producción máxima sería de 185 ml-N/h de biogás en este último modo batch. Con esto se puede concluir que la producción diaria de biogás en un reactor de modo semicontinuo es mayor a la de un reactor en modo batch para condiciones de carga orgánica similares. Esto será corroborado con la realización de experimentos y medición continua de la producción de biogás y metano.

En un estudio futuro se podría utilizar modelos matemáticos para comprender mejor la interacción entre los parámetros del proceso de digestión anaerobia. Variando las entradas del modelo, de acuerdo al sustrato que se utilice, se podría simular la producción de biogás para los diferentes sustratos de la región. Esto reduciría los tiempos y costos de inversión implicados en la realización de experimentos. Además, se podría simular la aplicación de diferentes estrategias de control y verificar con cual obtenemos un mejor performance del proceso.

Bibliografía

- [1] F. Acosta, H. Martí, and L. Gonzales, "Plan del Programa Nacional de Biodigestores en Perú," 2013.
- [2] M. Flores, "Biodigestores La Calera," in *Curso Internacional de Biogás: Diseño, Operación y Mantenimiento de Biodigestores Industriales*, 2012.
- [3] Renewables Academy (RENAC), "Curso Online Biogas 3," 2015.
- [4] M. Schon, "Numerical Modelling of Anaerobic Digestion Processes in Agricultural Biogas Plants," University of Innsbruck, 2009.
- [5] M. T. Varnero, *Manual de Biogás*, Primera Ed., vol. 53, no. 9. Santiago de Chile: Ministerio de Energía, 2013.
- [6] Renewables Academy (RENAC), "Online Training Electricity grids, Photovoltaic, Wind power, Biogas and PV- diesel mini-grids," no. 0. 2015.
- [7] P. del Espino, "Palmas del Espino S.A- Reporte de sensibilidad," Tocache, Perú, 2009.
- [8] Cidelsa, "Cidelsa Biodigestores," *Brochure*, Lima, Perú, 2015.
- [9] V. Martijn, J. Borobio, F. Acosta, and G. Ameller, "Estudio de Factibilidad para un Programa Nacional de Biogas Doméstico en Perú," pp. 1–82, 2012.
- [10] A. Wellinger, J. Murphy, and D. Baxter, *The Biogas Handbook*. 2013.
- [11] D. Deublein, A. S. Editors, W. V. GmbH, and C. Kga, *Book Review BIOGAS FROM WASTE AND RENEWABLE RESOURCES An introduction*, vol. 7, no. 4. Morlenbach: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008.
- [12] *Fermentation of organic materials - Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation test - VDI 4630*, First Edit. Berlin, Germany: Association of German Engineers, 2006.
- [13] B. Drog, *Process monitoring in biogas plants*. 2013.
- [14] D. J. Batstone *et al.*, *Anaerobic Digestion Model N°1*, First Edit., vol. 1, no. 1. Cornwall, UK: IWA Publishing, 2002.
- [15] A. J. Ward, P. J. Hobbs, P. J. Holliman, and D. L. Jones, "Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 17, pp. 7928–7940, 2008.
- [16] A. Wolfsberger, "Modelling and Control of the Anaerobic Digestion of Energy Crops," Bodenkultur University, 2008.
- [17] R. Labautut and C. Gooch, "Monitoring of anaerobic digestion process to optimize performance and prevent system failure," Ithaca, NY, 2012.
- [18] K. Boe and I. Angelidaki, "Implementation of online volatile fatty acids sensor for control and optimization of anaerobic process for low cost biogas production from manure," Lyngby Denmark, 2009.
- [19] C. Wolf, D. Gaida, and M. Bongards, "Predicting Organic Acids in Biogas Plants using UV / vis Spectrometry Online-Measurements," no. June, 2012.
- [20] H. Feitkenhauer, J. Von Sachs, and U. Meyer, "On-line titration of volatile fatty acids for the process control of anaerobic digestion plants," *Water Res.*, vol. 36, no. 1, pp. 212–218, 2002.

- [21] T. P. W. Vannecke, D. R. a Lampens, G. a Ekama, and E. I. P. Volcke, "Evaluation of the 5 and 8 pH point titration methods for monitoring anaerobic digesters treating solid waste.," *Environ. Technol.*, vol. 36, no. 7, pp. 861–9, 2015.
- [22] J. Lindmark, E. Thorin, R. Bel Fdhila, and E. Dahlquist, "Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 1030–1047, 2014.
- [23] K. Boe, "Online monitoring and control of the biogas process," Technical University of Denmark, 2006.
- [24] C. Wolf, "Simulation , optimization and instrumentation of agricultural biogas plants," National University of Ireland, 2013.
- [25] H. M. Falk, "Monitoring the anaerobic digestion process," Jacobs University, 2011.
- [26] I. Angelidaki *et al.*, "Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops : a proposed protocol for batch assays," pp. 927–934, 2009.
- [27] S. Gesari, B. Irigoyen, and A. Juan, "An experiment on the liquid–vapor equilibrium for water," *Am. J. Phys.*, vol. 64, no. 9, pp. 1165–1168, 1996.
- [28] A. Rozzi and E. Remigi, "Methods of assessing microbial activity and inhibition under anaerobic conditions : a literature review," pp. 93–115, 2004.
- [29] B. A. Anhwange, T. J. Ugye, and T. D. Nyiaatagher, "Chemical Composition of Musa sepientum (Banana) Peels .," *Electron. J. Environ. Agric. Food Chem.*, vol. 8, no. December, pp. 3–9, 2015.
- [30] M. Huaman and K. Hurtado de Mendoza, "Caracterización sensorial de salsa a base de Pleurotus ostreatus , cultivados en mazorcas de cacao (Theobroma cacao L .)," Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2015.
- [31] P. Wachirasiri, S. Julakarangka, and S. Wanlapa, "The effects of banana peel preparations on the properties of banana peel dietary fibre concentrate," *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 6, pp. 605–611, 2009.
- [32] I. A. Daniyan, A. O. Adeodu, and D. F. Adewumi, "Design of a Processor for the Production of 30 , 000 Tons of Caustic Potash per Anum from Cocoa Pod," vol. 3, no. 3, pp. 691–700, 2014.

ANEXOS

Anexo A: Análisis químicos

Materia seca (DM) y materia seca orgánica (ODM) a la cáscara de cacao, cáscara de plátano y digestato.

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA FACULTAD DE INGENIERÍA PESQUERA LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD		
INFORME DE ENSAYO N° 087-2015		Pág. 1 / 1	
SOLICITANTE :	UNIVERSIDAD DE PIURA		
DOMICILIO LEGAL :	AV. RAMÓN MUGICA N° 131-PIURA		
PRODUCTO DECLARADO :	M01: CASCARA DE CACAO M02: CASCARA DE PLATANO M03: LIQUIDO DEL BIODIGESTOR		
ESTADO/CONDICIÓN DE LA MUESTRA :	Cascara de cacao : Muestra en trozos pequeños/temperatura de refrigeración Cascara de plátano : Muestra en trozos pequeños/temperatura de refrigeración Líquido del biodigestor: Muestra líquida opaca/Temperatura ambiente		
CANTIDAD DE MUESTRA :	3 muestras x 250 g c/u		
FORMA DE PRESENTACIÓN :	Frasco de polietileno transparente, sin etiquetado		
MUESTREO :	Realizado por el cliente		
INSCRIPCIÓN DEL ENVASE :	Ninguna		
FECHA DE RECEPCIÓN :	08-09-2015		
FECHA DE INICIO DEL ENSAYO :	08-09-2015		
FECHA DE TÉRMINO DEL ENSAYO :	09-09-2015		

ENSAYOS	RESULTADO		
	M01	M02	M03
Materia seca (%)	19.71	14.93	2.61
Materia orgánica seca (%)	18.68	13.69	0.93

MÉTODOS:
Materia seca: Desecación en estufa a 105 °C/4 Horas.
Materia orgánica: Calcínación en mufla a 650 °C/ 4 horas.

INFORME DE ENSAYO EMITIDO EN BASE A RESULTADOS OBTENIDOS EN NUESTRO LABORATORIO, VALIDO ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA PROPORCIONADA.
NO DEBE SER UTILIZADO COMO CERTIFICADO DE CONFORMIDAD. PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL Y/O PARCIAL DEL PRESENTE DOCUMENTO.
ESTE DOCUMENTO ES VÁLIDO SOLO EN ORIGINAL. LA VALIDEZ DEL PRESENTE DOCUMENTO ES POR 30 DÍAS.

Piura, 09 de setiembre del 2015

Materia seca (DM) y materia seca orgánica (ODM) de estiércol vacuno fresco e inóculo.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERÍA PESQUERA
LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD



Pág. 1 / 1

INFORME DE ENSAYO N° 087-2015

SOLICITANTE : UNIVERSIDAD DE PIURA
DOMICILIO LEGAL : AV. RAMÓN MUGICA N° 131-PIURA
PRODUCTO DECLARADO : M01: ESTIERCOL FRESCO DE VACA
M02: LIQUIDO DEL BIODIGESTOR
ESTADO/CONDICIÓN DE LA MUESTRA : Estiércol fresco de vaca: Muestra fresca característica al producto.
Líquido del biodigestor: Muestra líquida opaca/Temperatura ambiente
CANTIDAD DE MUESTRA : 2 muestras x 250 g c/u
FORMA DE PRESENTACIÓN : Frasco de polietileno transparente, sin etiquetado
MUESTREO : Realizado por el cliente
INSCRIPCIÓN DEL ENVASE : Ninguna
FECHA DE RECEPCIÓN : 09-09-2015
FECHA DE INICIO DEL ENSAYO : 09-09-2015
FECHA DE TÉRMINO DEL ENSAYO : 10-09-2015

ENSAYOS	RESULTADO	
	M01	M02
Materia seca (%)	26.32	3.52
Materia orgánica seca (%)	23.28	1.78

MÉTODOS:
Materia seca: Desecación en estufa a 105 °C/4 Horas.
Materia orgánica: Calcínación: en mufla a 650 °C/ 4 horas.

INFORME DE ENSAYO EMITIDO EN BASE A RESULTADOS OBTENIDOS EN NUESTRO LABORATORIO, VALIDO ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA PROPORCIONADA.
NO DEBE SER UTILIZADO COMO CERTIFICADO DE CONFORMIDAD. PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL Y/O PARCIAL DEL PRESENTE DOCUMENTO.
ESTE DOCUMENTO ES VÁLIDO SOLO EN ORIGINAL. LA VALIDEZ DEL PRESENTE DOCUMENTO ES POR 30 DÍAS.

Piura, 10 de setiembre del 2015



Fidel Gonzales Mechato
LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD
Ing Fidel Gonzales Mechato
CIP N° 63458
IFFF

INFORME DE ENSAYO. CÓD. 0047. VERSIÓN: 01
PA: 09/10/2014

ANEXO B: Datos de mediciones

Ensayo de Potencial Bioquímico de Metano (BMP)

Materia prima	Gass	Parámetro	Día 1 (ml)	Día 2 (ml)	Día 3 (ml)	Día 4 (ml)	Día 5 (ml)	Día 6 (ml)	Día 7 (ml)	Día 8 (ml)	Día 9 (ml)	Día 10 (ml)	Día 11 (ml)	Día 12 (ml)
Cáscara de cacao	Biogás	Biogás acumulado	593	805	1080	1347	1627	1759	1837	1896	1946	2002	2070	2117
		Biogás por día	341	212	275	267	280	132	78	59	50	56	68	47
		Biogás-N acumulado	497.58931 34	702.01582 77	907.95922 49	1168.1260 89	1382.984 04	1509.701 25	1530.5423 77	1604.9516 3	1683.7587 37	1723.2773 04	1755.4728 25	1777.6278 11
		Biogás-N por día	286.1	184.9	231.2	231.5	238.0	113.3	65.0	49.9	43.3	48.2	57.7	39.5
		ml biogás-N/g ODM por día	38.3	24.7	30.9	31.0	31.9	15.2	8.7	6.7	5.8	6.5	7.7	5.3
		ml biogás-N/g ODM acumulado	38.3	63.0	94.0	125.0	156.8	172.0	180.7	187.4	193.2	199.6	207.3	212.6
	Metano	CH4 acumulado	462	584	710	833	980	1054	1106	1150	1170	1215	1268	1295
		CH4 por día	284	122	126	123	147	74	52	44	20	45	53	27
		CH4-N por día	238.31	106.39	105.93	106.67	124.95	63.51	43.33	37.25	17.30	38.74	44.95	22.67
		CH4-N acumulado	238.31	344.70	450.63	557.29	682.25	745.76	789.08	826.33	843.63	882.37	927.32	949.99
		mLCH4-N/g ODM por día	31.89	14.24	14.18	14.28	16.72	8.50	5.80	4.98	2.32	5.18	6.02	3.03
		mLCH4-N/g ODM acumulado	31.89	46.13	60.31	74.58	91.31	99.81	105.61	110.59	112.91	118.09	124.11	127.14

		%CH4-corrected	87.96	59.74	48.34	47.93	55.10	58.59	70.66	78.43	41.66	83.87	81.90	60.65
		%CH4-N accumulated corrected	77.91	72.55	65.74	61.84	60.23	59.92	60.21	60.65	60.12	60.69	61.26	61.17
Cáscara de banana	Biogás	Biogás acumulado	575	1021	1465	1829	2256	2439	2565	2654	2707	2778	2859	2897
		Biogás por día	345	446	444	364	427	183	126	89	53	71	81	38
		Biogás-N acumulado	482.48542 19	890.38280 76	1231.6298 74	1586.1192 4	1917.647 2	2093.326 52	2137.0937 38	2246.5936 84	2342.2070 41	2391.2409 35	2424.5878 29	2432.5875 15
		Biogás-N por día	289.5	388.9	373.3	315.7	363.0	157.1	105.0	75.3	45.9	61.1	68.7	31.9
		ml biogás-N/g ODM por día	52.9	71.0	68.2	57.6	66.3	28.7	19.2	13.8	8.4	11.2	12.5	5.8
		ml biogás-N/g ODM acumulado	52.9	123.9	192.0	249.7	316.0	344.6	363.8	377.6	385.9	397.1	409.6	415.5
	Metano	CH4 acumulado	444	629	823	1016	1288	1408	1494	1553	1569	1623	1692	1716
		CH4 por día	260	185	194	193	272	120	86	59	16	54	69	24
		CH4-N por día	218.17	161.33	163.10	167.37	231.21	102.99	71.65	49.94	13.84	46.48	58.52	20.15
		CH4-N acumulado	218.17	379.50	542.60	709.97	941.17	1044.17	1115.82	1165.76	1179.61	1226.09	1284.60	1304.76
		mLCH4-N/g ODM por día	39.84	29.46	29.78	30.56	42.22	18.81	13.08	9.12	2.53	8.49	10.69	3.68
		mLCH4-N/g ODM acumulado	31.89	61.35	91.13	121.69	163.91	182.72	195.80	204.92	207.45	215.94	226.63	230.31
		%CH4-corrected	79.59	43.06	46.10	55.17	66.86	68.53	72.34	69.72	31.44	79.38	89.51	66.68

		%CH4-N acumulado corregido	81.55	63.95	59.27	57.80	59.92	60.33	61.73	61.54	60.36	60.98	62.18	62.53
Estiércol vacuno	Biogás	Biogás acumulado	332	400	478	564	601	615	615	615	615	642	695	728
		Biogás por día	102	68	78	86	37	14	0	0	0	27	53	33
		Biogás-N acumulado	278.58	348.83	401.86	489.10	510.86	527.84	512.40	520.59	532.12	552.62	589.40	611.30
		Biogás-N por día	85.59	59.30	65.57	74.58	31.45	12.02	0.00	0.00	0.00	23.24	44.95	27.71
		ml biogás- N/g ODM por día	9.2	6.4	7.0	8.0	3.4	1.3	0.0	0.0	0.0	2.5	4.8	3.0
		ml biogás- N/g ODM acumulado	9.2	15.6	22.6	30.6	34.0	35.3	35.3	35.3	35.3	37.8	42.6	45.6
	Metano	CH4 acumulado	273	310	370	433	480	530	559	590	608	650	683	722
		CH4 por día	85	37	60	63	47	50	29	31	18	42	33	39
		CH4-N por día	71.32	32.27	50.44	54.63	39.95	42.91	24.16	26.24	15.57	36.15	27.99	32.75
		CH4-N acumulado	71.32	103.59	154.03	208.67	248.62	291.53	315.69	341.93	357.51	393.66	421.65	454.40
		mLCH4-N/g ODM por día	7.66	3.47	5.42	5.87	4.29	4.61	2.59	2.82	1.67	3.88	3.01	3.52
		mLCH4-N/g ODM acumulado	31.89	35.36	40.77	46.64	50.93	55.54	58.13	60.95	62.62	66.51	69.51	73.03
		%CH4- corregido	88.01	56.48	81.16	76.22	133.33	373.23	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	162.36	65.42	124.77
		%CH4-N acumulado corregido	86.84	80.45	81.67	79.88	83.83	90.06	96.33	100.89	102.96	105.67	103.26	104.70

Temperatura (°C)	34.15	27.65	33.85	28.65	32.07	30.45	35.25	32.75	29.05	29.95	32.45	34.04
Presión atmosférica (kPa)	100.9989	100.9918	100.9985	100.9929	100.9966	100.9949	101.0000	100.9974	100.9934	100.9943	100.9970	100.9987
Presión de vapor (kPa)	5.3646	3.7039	5.2757	3.9258	4.7743	4.3544	5.7015	4.9607	4.0177	4.2314	4.8777	5.3318

Datos de mediciones de pH y titulación (para estimación de ratio FOS/TAC) en Reactor Semicontinuo

		10/19/15	10/20/15	10/21/15	10/22/15	10/23/15	10/24/15	10/26/15	10/27/15	10/28/15	10/29/15	10/30/15	10/31/15	11/1/15	11/2/15	11/3/15
pH of biol		6.94	6.91	6.94	6.86	6.85	6.88	7.03	7.01	6.95	7.02	7.03	7.02	...	7.03	7.12
Titulación (ml)	Vol_1@pH 5.00	13.85	...	13.7	...	13.65	...	14.4	...	14.1	...	14.3	FAILED	...
	Vol_2@pH 4.40	14.3	...	14.15	...	14.1	...	14.8	...	14.5	...	14.7	FAILED	...