

Diseño, desarrollo y evaluación de un biodigestor compacto para la valorización energética

Design, Development, and Evaluation of a Compact Biogas Digester for Energy Recovery

^aAlberto González Sánchez, ^bFelipe García Ramírez, ^cDaniel Tress Fuentes

CIATEQ A.C., Parque Industrial Bernardo Quintana, Av. Manantiales No.20, El Marqués, CP 76246, Querétaro, México. Tel (442)1961500

^aalberto.gonzalez@ciateq.mx, ^bfelipe.garcia@ciateq.mx, ^cdaniel.tress@ciateq.mx

Resumen

Se presenta el diseño, desarrollo y evaluación experimental de un biodigestor compacto de operación semicontinua para la valorización energética de biomásas residuales en aplicaciones domésticas asociadas a contextos de pobreza energética. El sistema se diseñó considerando criterios técnicos como el control de sólidos totales y volátiles, relación C/N adecuada y condiciones mesofílicas. Asimismo, se incorporaron criterios mecánico-funcionales de compactidad, hermeticidad y uso de materiales plásticos disponibles localmente. La validación experimental incluyó pruebas a nivel matraz y reactores de 30 y 150 L, empleando nopal, residuos vegetales y guayaba con estiércol bovino como inóculo. Se obtuvo una producción estable de biogás, con concentraciones promedio de metano de 72.6% y máximas de 88.7%. La integración de aislamiento térmico pasivo y un sistema de compresión manual permitió mejorar la eficiencia del proceso y facilitar el aprovechamiento del biogás en cocción de alimentos, validando la viabilidad técnica y funcional del sistema propuesto.

Abstract

This paper presents the design, development, and experimental evaluation of a compact semi-continuous biodigester for the energy recovery of residual biomass in domestic applications associated with energy poverty contexts. The system was designed considering technical criteria such as total and volatile solids control, adequate C/N ratio, and mesophilic conditions. Mechanical and functional criteria such as compactness, airtightness, and the use of locally available plastic materials were also incorporated. Experimental validation included tests at the flask level and in 30- and 150-liter reactors, using nopal, vegetable waste, and guava with cattle manure as inoculum. Stable biogas production was obtained, with average methane concentrations of 72.6% and maximum concentrations of 88.7%. The integration of passive thermal insulation and a manual compression system improved the efficiency of the process and facilitated the use of biogas for cooking, validating the technical and functional viability of the proposed system.

Palabras clave:

Evaluación de Biodigestor, Valorización energética, Biogás doméstico, Compresión manual

Keywords:

Biodigester evaluation, Energy recovery, Domestic biogas, Manual compression

Introducción

La pobreza energética constituye uno de los principales retos para el desarrollo social y económico en México, particularmente en comunidades rurales y periurbanas donde el acceso continuo, seguro y asequible a fuentes modernas de energía es limitado [1],[2]. De acuerdo con múltiples diagnósticos sobre eficiencia y uso de la energía, una proporción relevante de los hogares aún depende de combustibles sólidos tradicionales, como la leña, para la cocción de alimentos, lo que genera impactos negativos en la salud, el medio ambiente y la economía doméstica [3],[4]. Ante este escenario, el desarrollo de soluciones energéticas descentralizadas, basadas en recursos locales y tecnologías de bajo costo, se reconoce como una estrategia clave para mitigar la pobreza energética y fortalecer la autosuficiencia energética a nivel comunitario.

En este contexto, la biodigestión anaerobia de biomásas residuales se ha consolidado como una alternativa tecnológica viable para la generación de energía renovable. Los biodigestores permiten transformar residuos orgánicos de origen agrícola, pecuario y doméstico en biogás, una mezcla rica en metano que puede emplearse directamente en actividades de cocción de alimentos y generación de calor [5]-[8]. Además, el proceso produce un digestato con potencial aplicación como fertilizante orgánico, favoreciendo esquemas de economía circular y manejo integral de residuos [9],[10]. Estas ventajas han motivado el desarrollo de múltiples configuraciones de biodigestores, diseñadas para aplicaciones domésticas, comunitarias e industriales [11]-[13].

Sin embargo, a pesar de su potencial, los sistemas de biodigestión presentan diversas limitaciones técnicas y ope-

rativas que restringen su adopción en contextos de pequeña escala. Entre las principales problemáticas se encuentran la baja eficiencia de conversión energética, la inestabilidad del proceso biológico, el control deficiente de variables críticas como la temperatura, el pH y el tiempo de retención hidráulica, así como dificultades asociadas a la hermeticidad y al manejo seguro del biogás [14]-[18]. Asimismo, muchos biodigestores convencionales requieren grandes volúmenes, presentan elevados costos de fabricación e instalación, o demandan conocimientos técnicos especializados para su operación y mantenimiento, lo que limita su viabilidad en comunidades con recursos económicos y técnicos restringidos [19]-[23].

En respuesta a estas limitaciones, diversos trabajos han propuesto diseños innovadores que incorporan configuraciones compactas, materiales alternativos, sistemas modulares y mecanismos de mejora en la captura y almacenamiento del biogás [24],[25],[26]. Estas propuestas buscan optimizar el desempeño energético del proceso de biodigestión, reducir costos y facilitar la instalación y operación de los sistemas en diversos entornos. No obstante, persisten desafíos relacionados con la adaptación de estos diseños a condiciones locales específicas, producción a pequeña escala, materiales asequibles y la integración de criterios de sustentabilidad desde la etapa de diseño.

En este sentido, el presente trabajo se enfoca en el diseño y desarrollo de un biodigestor compacto para la valorización energética de biomásas residuales, considerando criterios técnicos, económicos y de sustentabilidad. El objetivo es proponer una solución accesible y funcional que contribuya a la reducción de la pobreza energética mediante el aprovechamiento eficiente de recursos locales, fortaleciendo el uso de tecnologías limpias y descentralizadas para aplicaciones domésticas.

2. Metodología y criterios de diseño

El diseño y desarrollo del biodigestor tiene por objetivo contribuir a la reducción de la pobreza energética mediante el aprovechamiento eficiente de fuentes energéticas disponibles localmente, particularmente biomásas residuales generadas en las zonas de estudio.

El sistema propuesto prioriza un diseño compacto, eficiente y seguro, que permita la generación de energía a partir del proceso de biodigestión bajo criterios de sustentabilidad, accesibilidad tecnológica y bajo costo. También, contempla estrategias para maximizar la valorización energética del residuo, promoviendo su conversión en productos de mayor valor, favoreciendo un enfoque de economía circular que fortalezca la viabilidad técnica, ambiental y social del sistema.

La Figura 1 describe la metodología general empleada durante el diseño y desarrollo del biodigestor.

Se inicia con una revisión del estado de la técnica para identificar los tipos de biodigestores y las tecnologías de producción de biogás existentes, lo cual establece las bases para

la selección de tipos de materiales, configuraciones y condiciones de operación. Todo con la finalidad de mejorar el diseño del equipo.

Figura 1 – Metodología de diseño y desarrollo



La etapa siguiente consiste en determinar los tipos de biomasa a emplear y su caracterización en laboratorio. De forma paralela se realiza la selección del tipo de biodigestor, el cual durante el desarrollo del proyecto fue el semicontinuo.

Luego se especifican los parámetros de operación iniciales y en el transcurso de las pruebas se afinan los valores de control. Se emplearon 3 volúmenes diferentes de biorreactor, los cuales fueron de 4, 30 y 150 litros; en cada uno de ellos se realizaron adaptaciones para su correcto sellado.

Posteriormente se realizó el diseño mecánico del prototipo, los planos correspondientes y finalmente se construyó el biodigestor. En la fase de pruebas, la producción de biogás se cuantificó a través de su volumen y la calidad, contenido de metano, mediante cromatografía de gases.

Los criterios técnicos iniciales fueron:

Los criterios de diseño mecánico funcionales objetivo del proyecto fueron:

- Durabilidad: Vida útil superior a cinco años bajo condiciones normales de operación.
- Compacidad: Dimensiones máximas de 1.2 m de ancho, 1.2 m de largo y 2 m de altura, apto para instalación en espacios domésticos.
- Materiales: Uso de componentes plásticos de fácil disponibilidad local para el reactor y las conexiones en contacto con el biogás.

- Configuración geométrica: Diseño cilíndrico vertical con tapa removible.
- Boquillas: Incorporación de aberturas de tamaño adecuado; boquillas de alimentación, drenado de lodos, de salida de efluente y salida de biogás.
- Hermeticidad: Garantía de sellado en el reactor y en las uniones de tuberías para evitar fugas de biogás.
- Almacenamiento de biogás: Sistema de almacenamiento flexible y hermético.
- Facilidad de armado: Ensamble sencillo, realizable por los usuarios con herramientas y materiales de uso común.
- Ergonomía: Diseño adecuado para usuarios con estatura promedio de 1.6 m.
- Sistema de compresión: Integración de un sistema opcional de compresión manual para el llenado de cilindros comerciales de gas.
- Aislamiento térmico pasivo: Incorporación de una cubierta tipo invernadero dentro de las dimensiones establecidas.
- Operación y mantenimiento: Operación simple, de bajo esfuerzo y costos mínimos de mantenimiento.

Tabla 1 – Criterios técnicos.

Criterio	Valor / Respuesta
Tipo de biodigestor	Semicontinuo
Tipo de biomasa	Residual
Contenido de sólidos totales	20%
Contenido de sólidos volátiles	12%
Relación C/N	35:1
Tiempo de retención hidráulica	25 días
Volumen del reactor (litros)	4, 30 y 150
Volumen de trabajo	75%
Material del reactor	Polietileno/PVC
Temperatura de operación	20-35°C
pH de operación	6.5-7.5
Sistema de agitación	NA
Captación de biogás	Bolsa y Compresión

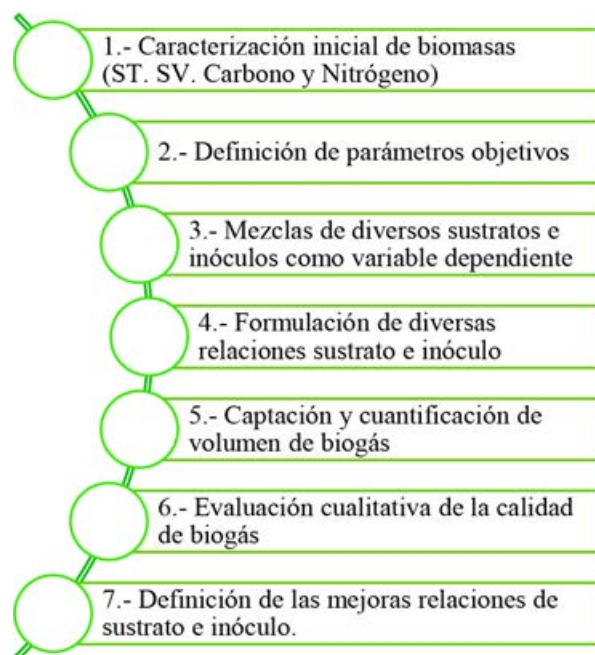
La experimentación se desarrolló en tres niveles secuenciales, donde los resultados de cada etapa sirven de entrada para la siguiente. La Figura 2 muestra los niveles.

La metodología experimental de laboratorio se presenta de forma secuencial en la Figura 3. Este esquema detalla las etapas consecutivas, permitiendo visualizar el flujo de trabajo, la relación de variables y el orden cronológico de cada fase.

La caracterización inicial de las biomásas es fundamental para establecer su composición base. Los sólidos totales y volátiles se determinaron por gravimetría a 105 y 500 °C, respectivamente. El nitrógeno se cuantificó mediante el método Kjeldahl, mientras que el carbono orgánico total se

estimó a partir del carbono orgánico oxidable (método de Walkley-Black), aplicando un factor de corrección de 1.33 para compensar la oxidación incompleta.

A partir de los resultados obtenidos, se diseñó la mezcla experimental bajo los parámetros objetivo de 20% de sólidos totales, 12% de sólidos volátiles y una relación carbono nitrógeno de 35:1. Tras iniciar las pruebas de biodigestión, el biogás generado se capturó en bolsas tipo venoclis y su volumen acumulado se cuantificó mediante el método de desplazamiento hidráulico.

**Figura 2** – Niveles de ensayo realizados**Figura 3** – Metodología experimental en laboratorio

La eficiencia cualitativa del proceso se evaluó a través de la prueba de flama, clasificando el comportamiento del gas en tres etapas consecutivas. La primera es la fase de purga, donde el metano es menor al 30% debido a su dilución en aire. Después la fase de transición, caracterizada por un contenido de metano de entre el 35 y 45% con una flama naranja e inestable debido a impurezas y al efecto amortiguador del dióxido de carbono. Finalmente, la fase estacionaria se identifica por una concentración de metano superior al 50% junto a una flama azul y estable de combustión completa. Para validar metodológicamente este diagnóstico visual, se mantuvieron estrictamente constantes las variables físicas del ensayo, tales como la presión de suministro, la geometría del mechero y las condiciones ambientales del entorno,

garantizando así que la evolución de la flama respondiera exclusivamente a la madurez biológica y a la composición química del biogás.

Una vez seleccionadas las mejores relaciones sustrato-inóculo en función del mayor rendimiento y calidad de biogás, se iniciaron las pruebas a escala piloto utilizando dichas formulaciones. En la Figura 4 se presenta la secuencia de prueba con y sin aislamiento térmico pasivo.



Figura 4 – Metodología a nivel piloto

La experimentación a escala de prototipo se ejecutó con el objetivo de evaluar la estabilidad en la producción de metano y determinar su factibilidad de uso. Para ello, se validaron los parámetros fijados en la formulación base, manteniendo el control del proceso operativo de manera uniforme frente a las variaciones en los tipos de biomásas alimentadas al biodigestor. Adicionalmente, el desarrollo metodológico incorporó el acoplamiento de un sistema de aislamiento térmico pasivo, la compresión del biogás en cilindros comerciales y la ejecución de pruebas de combustión controladas en una parrilla comercial.

3. Desarrollo del biodigestor y análisis de resultados

Derivado de la revisión del estado de la técnica, así como de los posibles lugares de emplazamiento del equipo desarrollado se identificó al nopal silvestre como una de las biomásas principales a emplear en la producción de biogás. Las razones son diversas, entre las cuales están su amplia disponibilidad en múltiples regiones del país, su rápido crecimiento y los pocos requerimientos para su cultivo. También

se emplearon residuos vegetales y sobrantes de guayaba, con el fin de aprovechar los desechos agroindustriales locales y evaluar la estabilidad del proceso ante la variabilidad de los sustratos suministrados al biodigestor (Ver Figura 5).



Figura 5 – Biomásas empleadas en el desarrollo

Se utilizó inóculo derivado de estiércol, específicamente de origen bovino y ovino, para las pruebas. En la Figura 6 se observan los resultados de algunas determinaciones en las biomásas, específicamente el contenido de sólidos totales y el de sólidos volátiles.

RESULTADOS			
MUESTRA	Sólidos Totales (ST)	Sólidos Volátiles (SV) Base Húmeda	Sólidos Volátiles (SV) Base Seca
M1: Estiércol ovino	51.7%	26.2%	49.7%
M2: Nopal fresco	8%	5.9%	77%
M3: Residuos de verduras	12.8%	10.9%	86.7%

EVIDENCIA FOTOGRÁFICA			

Méndez L.M. (2020). Manual de practicas de análisis de alimentos. Xalapa, Veracruz. Facultad de química biológica. Universidad Veracruzana.

Figura 6 – Caracterización de biomásas en laboratorio

Se realizaron las determinaciones del contenido de carbono, así como el de nitrógeno para obtener la relación C/N. La Figura 7 muestra etapas las evaluaciones para el nopal tierno y maduro.

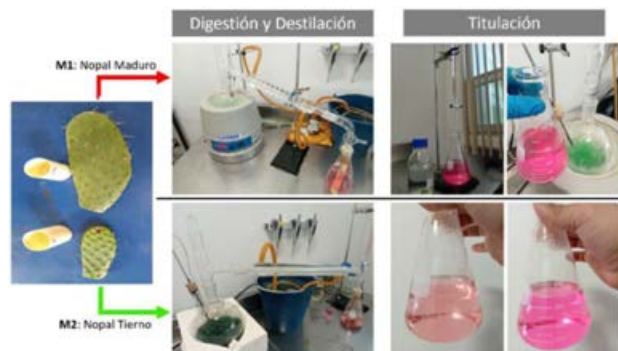


Figura 7 – Determinaciones de carbono y nitrógeno

Los resultados del laboratorio se utilizaron para formular distintos tipos de mezcla sustrato e inóculo para evaluar las condiciones generales del proceso. Se realizaron experimentos a nivel laboratorio, en la Figura 8 se aprecian los matraces de prueba.



Figura 8 – Experimentos a nivel matraz

A este nivel, el biogás se captaba en bolsas tipo venoclisis y posteriormente se realizaba la cuantificación del volumen de biogás producido. La Figura 9 muestra una de las bolsas después de 1 día de prueba, una vez estabilizado el proceso.



Figura 9 – Biogás contenido en bolsa tipo venoclisis

Al contenido se le realizaba la prueba de flama para evaluar de forma cualitativa la calidad del biogás, los criterios eran formación de flama, color e intensidad, así como el tiempo de duración. Ver la Figura 10.



Figura 10 – Prueba de flama en biogás

Las pruebas de biodigestión a nivel matraz permiten establecer que existe un periodo de 15 días para que el proceso se estabilice y comience a generar biogás con el contenido de metano adecuado para mantener la flama encendida, previo a ese periodo de tiempo el biogás producido tiene olor a azufre y la flama no enciende o no se mantiene.

Los experimentos también permiten definir 2 opciones principales de relación nopal estiércol bovino, como las de mayor producción de biogás, las relaciones son 1:1 y 2:1. Además de la importancia de reducir el tamaño de la biomasa para acelerar la tasa de hidrólisis.

En la Tabla 2 se aprecian las cantidades de material empleados de acuerdo con cada una de las relaciones.

Tabla 2 – Composición por cada relación.

Composición	Relación 1:1	Relación 2:1
Sustrato = Nopal (kg)	1.01	1.82
Inóculo = Estiércol bov.(kg)	1.01	0.91
Agua (L)	0.97	0.27

Se procede a escalar el proceso y confirmar los hallazgos de los matraces, se evaluaron dos biorreactores de 30 litros conectados a domos flotantes independientes para almacenar el biogás (Ver Figura 11). El reactor R2 incluye un sistema de aislamiento térmico pasivo compuesto por una cubierta plástica tipo invernadero y pintura negra, mientras que el reactor R1 carece de aislamiento.

Operados con la misma formulación (Relación 2:1), el reactor R2 produjo mayor volumen de biogás y redujo el proceso en 5 días comparado con R1. Esto confirma que el aislamiento térmico pasivo de R2 elevó y estabilizó la temperatura interna, acelerando la reacción, con un análisis final de la calidad mediante pruebas de flama y cromatografía de gases.



Figura 11 – Biodigestores de 30 litros

En la Figura 12 se observa un cromatograma con 69.5% de metano en la muestra obtenida de R2.

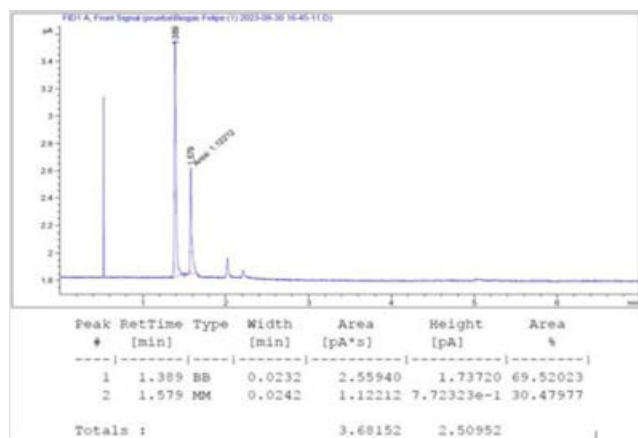


Figura 12 – Cromatograma del contenido de metano

Se identifica la necesidad de comprimir el biogás para facilitar su almacenamiento, transporte y uso práctico. Por lo que se implementó un sistema de compresión manual para almacenarlo en un tanque de 30 litros de capacidad y presión de trabajo de hasta 150 PSI. Se adaptó un pistón de doble efecto donde se utilizó un solo puerto para ingreso y compresión con una línea de extracción hacia los domos flotantes y una línea de llenado hacia el tanque de almacenamiento, ambos con una válvula antirretorno para solo succionar y comprimir. Al pistón se le adaptó una palanca para minimizar el esfuerzo de compresión tal como se observa en la Figura 13.



Figura 13 – Sistema de compresión manual de biogás

Se procede a la elaboración de los planos del biodigestor con capacidad de 150 litros. Se incluyen las mejoras tanto de proceso como mecánicas funcionales, principalmente lo referente al sellado de uniones para evitar fugas. La Figura 14 contiene el plano elaborado.

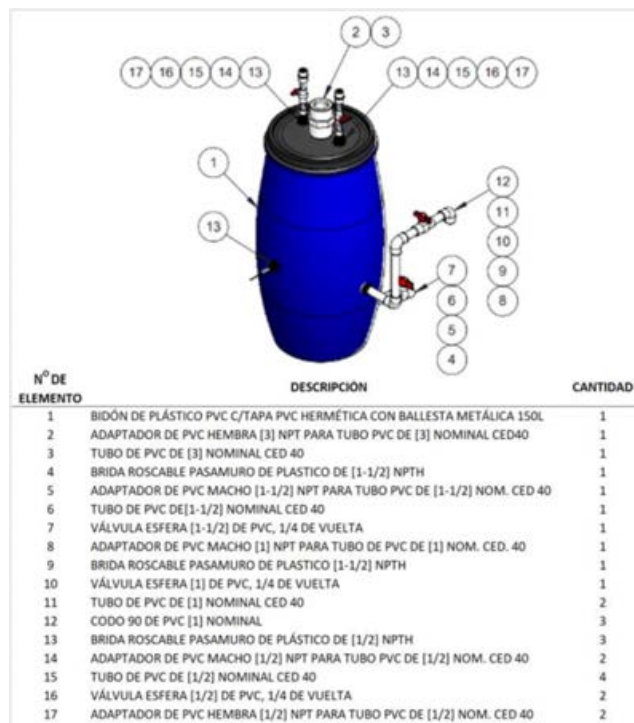


Figura 14 – Plano del biodigestor de 150 litros

El plano de la estructura junto con la cubierta tipo invernadero se ilustra en la Figura 15.

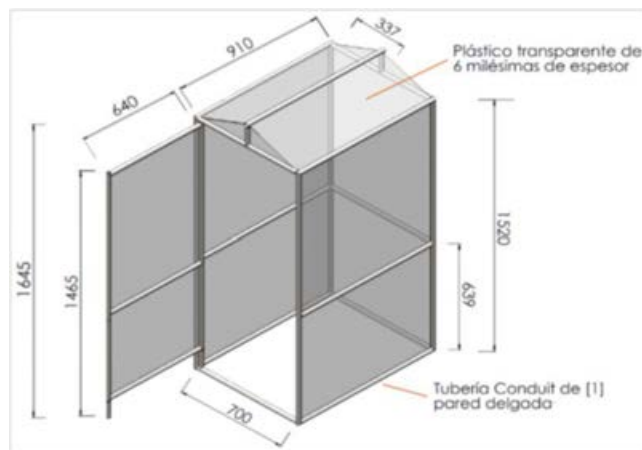


Figura 15 – Plano de la cubierta tipo invernadero

Para la fase de pruebas se elaboró un formato de control y registro del proceso. La información obtenida permite el monitoreo, la identificación de tendencias, la estabilización y optimización de la producción. El formato realizado se aprecia en la Figura 16.

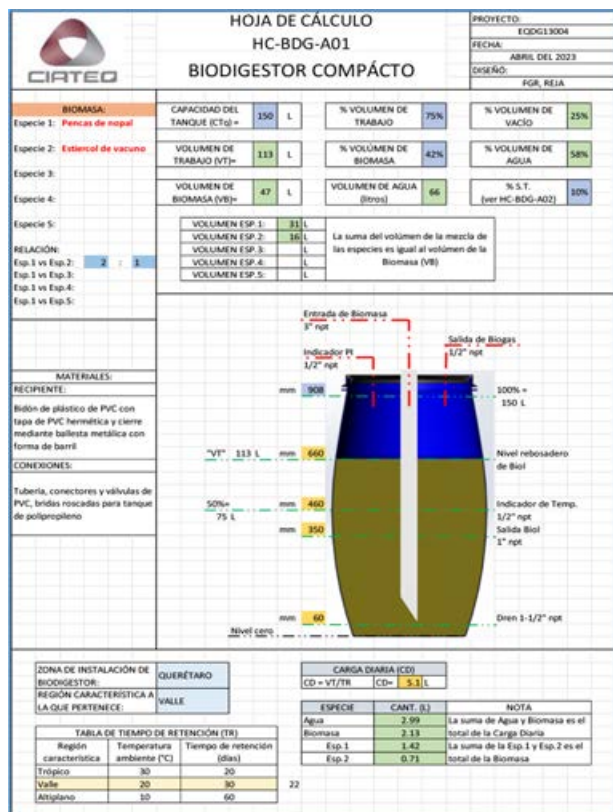


Figura 16 – Formato de control y registro de proceso

Con las especificaciones de los planos se procede a la fase constructiva del biodigester de 150 litros de capacidad. La selección de los componentes prioriza materiales comerciales o accesibles. En la Figura 17, del lado izquierdo, se observa un contenedor plástico de polietileno de alta densidad con conexiones, tubería y válvulas de PVC. En el lado derecho el contenedor presenta la cubierta plástica instalada.



Figura 17 – Construcción de biodigester de 150 litros

Después de terminar el ensamble del sistema, así como concluidas las pruebas de sellado de uniones, se procede a la operación del biodigester. En la Figura 18 se observa un cambio en el sistema de captación del biogás, se utiliza una bolsa tipo lona, de 0.5 m³ de capacidad, en vez del domo flotante.



Figura 18 – Operación de biodigester de 150 litros

En este nivel de operación se determinó que el inóculo requiere un periodo de adaptación de 10 días para regular su reproducción y crecimiento. Durante este tiempo las bacterias se preparan para realizar la hidrólisis y acidogénesis inicial. Finalizada la etapa de adaptación o aclimatación es el momento ideal para proceder a la alimentación del sustrato, por ejemplo, materia orgánica procedente de nopal, desechos vegetales, desechos municipales, por mencionar algunos.

Se observa que en el periodo de 10-25 días se comienza a generar biogás con variaciones en la concentración de metano, bióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno. A partir del día 25 en adelante la concentración de metano en el biogás se estabiliza en valores cercanos al 70%. Durante la operación del biodigester se obtuvo una concentración máxima de 88.7%, como puede notarse en la Figura 19.

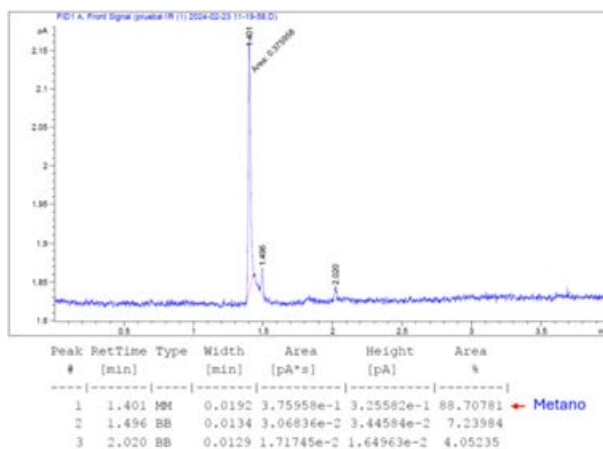


Figura 19 – Contenido de 88.70% de metano en biogás

El biodigester se operó durante 4 meses en el municipio del Marqués, Querétaro, a partir de noviembre de 2023 hasta febrero de 2024 de forma semicontinua. El sustrato inicial fue nopal, posteriormente residuos vegetales y finalmente sobrantes de guayaba. El objetivo era generar cambios en la materia orgánica suministrada al biodigester y con ello

observar su comportamiento. El método de estabilización empleado fue mediante la caracterización de la materia prima y la adaptación de las proporciones de la formulación a través de los criterios del contenido de sólidos totales y volátiles, los cuales permanecieron constantes.

La Figura 20 contiene la evolución del porcentaje de metano en la corriente de biogás durante el periodo de 4 meses de operación e incluye las etapas de alimentación de los diversos sustratos.



Figura 20 – Evolución del contenido de metano

El contenido promedio de metano de 72.6% confirma la estabilidad del proceso y una alta eficiencia de conversión, situándose en el rango superior esperado para la producción de biogás de calidad. Las determinaciones cromatográficas se complementaban con la prueba de flama, la Figura 21 muestra una flama azul intensa lo que representa una combustión completa y eficiente.



Figura 21 – Flama con alto contenido de metano

El biodigestor de 150 litros de capacidad se operó a un 75% de su volumen útil con una carga inicial de 112.5 kg totales, compuesta por 67.16 kg de nopal, 33.58 kg de estiércol bovino y 11.75 L de agua, estableciendo un 20% de ST y un 12.65% de SV en la mezcla. A partir del día 10, el sistema se operó en un régimen semicontinuo mediante una alimentación diaria de 1.373 kg de nopal, 0.686 kg de estiércol y 0.24 L de agua. Durante la fase de arranque de los primeros 30 días, se obtuvo una producción acumulada de 1.50 m³ de biogás con una composición promedio de metano del 69.50%,

equivalente a un volumen neto de 1.04 m³ de CH₄ puro; por lo tanto, el rendimiento específico real para este primer mes se consolidó en 0.051 m³ CH₄/kg SV alimentado.

Durante el segundo mes de operación, correspondiente a la fase estacionaria y estabilizada del proceso, el sistema registró una producción acumulada de 4.98 m³ de biogás. El análisis cromatográfico de este periodo reveló una composición promedio de metano del 72.64%, lo que representó un volumen neto de 3.62 m³ de CH₄ puro generados en condiciones controladas. Al evaluar esta producción en función de la carga orgánica continua introducida durante estos 30 días (un total de 8.73 kg de SV), el rendimiento específico real se incrementó de manera notable hasta alcanzar los 0.414 m³ CH₄/kg SV alimentado.

La energía térmica equivalente generada por el biodigestor el segundo mes se determinó mediante un balance energético donde 3.62 m³ de metano equivalen a 36.09 kWh de energía térmica con base al poder calorífico inferior de 9.97 kWh/m³, un valor obtenido mediante el producto directo del volumen neto generado por el factor de conversión energética (3.62 m³ × 9.97 kWh/m³ = 36.09 kWh).

La abundante generación de biogás se comprimió en cilindro comercial, lo cual permitió realizar pruebas de combustión en quemadores destinados a la cocción de alimentos. En la Figura 22 se observa la actividad; la flama no se apagó, no se presentaron eyecciones bruscas ni hubo presencia de olores desagradables.



Figura 22 – Cocción de alimentos con biogás

Un rasgo diferenciador con respecto a otros diseños de biodigestores es la inclusión de un sistema de compresión manual del biogás en tanques de gas doméstico. Lo cual evita los equipos voluminosos tradicionales, susceptibles de fugas por rasgado de bolsa donde contienen el gas producido; lo que hace más compacto el sistema desarrollado en este proyecto.

Los hallazgos y mejoras se integran en la elaboración de un instructivo y manual de operación, el cual traduce variables de proceso en actividades específicas que no requieren equipos sofisticados de control y operación del proceso. Fi-

nalmente se integra un diseño final con las lecciones aprendidas durante la realización del proyecto. Las Figuras 23 y 24 muestran el diseño final propuesto.



Figura 23 – Vista interna del sistema



Figura 24 – Vista general del diseño final del equipo

Conclusión

El diseño y desarrollo del biodigestor semicontinuo presentado en este trabajo demostró ser una alternativa técnica, funcional y sustentable para la valorización energética de

biomasa residual disponible localmente, con aplicación directa en contextos de pobreza energética. La metodología empleada, basada en la revisión del estado de la técnica, la caracterización de biomasa, la experimentación a distintas escalas y el diseño mecánico funcional, permitió establecer criterios claros de operación y construcción que garantizaron la estabilidad del proceso de biodigestión y la eficiencia en la producción de biogás.

Los resultados experimentales evidenciaron que el uso de nopal silvestre, en combinación con estiércol bovino como inóculo, constituye una biomasa viable y de alto potencial energético, logrando formulaciones óptimas, así como una producción estable a partir del día 25. El escalamiento progresivo desde pruebas a nivel matraz hasta un biodigestor de 150 litros permitió validar los parámetros técnicos definidos, obteniéndose concentraciones promedio de metano de 72.6% y valores máximos de hasta 88.7%, lo que confirma una alta calidad del biogás producido.

La incorporación de criterios de diseño mecánico-funcionales, tales como la compactidad, hermeticidad, facilidad de armado, ergonomía y el uso de materiales comerciales, favoreció la viabilidad del sistema para su implementación en entornos domésticos. Asimismo, el uso de aislamiento térmico pasivo mediante una cubierta tipo invernadero demostró incrementar la velocidad del proceso y el volumen de biogás generado, evidenciando la importancia del control térmico en sistemas de pequeña escala.

Un aporte diferenciador del biodigestor desarrollado es la integración de un sistema de compresión manual del biogás hacia cilindros comerciales, lo cual mejora el almacenamiento, transporte y aprovechamiento práctico del gas, reduciendo riesgos asociados a sistemas voluminosos de almacenamiento flexible. La validación del biogás comprimido en pruebas reales de cocción de alimentos confirmó su aplicabilidad energética.

En conclusión, los resultados confirman que el biodigestor desarrollado cumple con los parámetros técnicos, mecánicos y de sustentabilidad previstos; esto lo posiciona como una solución accesible de alto impacto para la valorización energética descentralizada de residuos orgánicos.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de las actividades desarrolladas en CIA-TEQ, en el marco del proyecto EQDG13004 “Biodigestión sostenible para el aprovechamiento de residuos orgánicos”.

Referencias

- [1] [1] Comisión Nacional para el uso Eficiente de la Energía (CONUEE) (2022) Servicios energéticos, Pobreza y eficiencia energéticas: una perspectiva desde México. Cuadernos de la CONUEE, No. 8.
- [2] García-Ochoa, R., & Graizbord, B. (2016). Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional. *Economía Sociedad y Territorio*, 16(51), 289. <https://doi.org/10.22136/est002016465>
- [3] Secretaría de energía (2025). Programa de Estufas Eficientes de Leña para el Bienestar. gob.mx. Recuperado el 23 de enero de 2026, de <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-estufas-eficientes-de-lena-para-el-bienestar-395098?state=published>
- [4] Fullerton, D. G., Bruce, N., & Gordon, S. B. (2008). Indoor air pollution from biomass fuel smoke is a major health concern in the developing world. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 102(9), 843–851. <https://doi.org/10.1016/j.trstmh.2008.05.028>
- [5] Galicia, A. G. (2013b). Biogas production system (Patent Núm. 2013089544:A1). En World Patent (2013089544:A1).
- [6] Roos, K. F. (2007). Anaerobic digester system for animal waste stabilization and biogas recovery (Patent Núm. 2007130513:A1). En World Patent (2007130513:A1).
- [7] Wasmuht, K., Gessler, W., & Stuffer, K. (2013). Producing biogas from waste water of beverage- and food industry, comprises collecting two waste waters separately and mixing in a certain mixing ratio of an anaerobic treatment stage and supplying to the biogas production (Patent Núm. DE:102011084511:A1). En Patent (DE:102011084511:A1).
- [8] Jacobs, H.-H. (2002). Assembly for the production of a biogas from solid agricultural waste has an automatic feed system to charge the fermentation vessel from the supply container (Patent Núm. DE:10110861:A1). En Patent (DE:10110861:A1).
- [9] Pesce, L. (2021). Anaerobic process for producing biogas with a high methane content by means of the biodegradation of organic waste (Patent Núm. 11085058). En US Patent (Núm. 11085058).
- [10] Pesce, L. (2023). Process for accelerating, increasing, and stabilizing production of biogas with a high methane content in systems for anaerobic biodegradation of organic wastes (Patent Núm. 11713473). En US Patent (Núm. 11713473).
- [11] Godoy, F. R. (2022). Compact biodigester (Patent Núm. 2022120505:A1). En World Patent (2022120505:A1).
- [12] Castro Morales, I. G., & Rodríguez Gámez, M. (2022). Potencial de producción de biogás para su aprovechamiento energético en el contexto rural de Manabí. *Ingeniería Energetica*, 43(3), 62–70. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012022000300062
- [13] Tenbrink, J. (2016). Method and plant for generating biogas (Patent Núm. 3041925:A1). En European Patent (3041925:A1).
- [14] Cai, J., Huang Z., Cai D. (2015). High-efficiency biogas generating device (Patent Núm. CN:104928155:A). En Patent (CN:104928155:A).
- [15] Machado, J. A. (2008). Hermetic biodigester with expansion and retraction chamber (Patent Núm. BR:-MU8602953:U). En Patent (BR:MU8602953:U).
- [16] Menschel, C., Kretschmer, A., Preusker, C., Lindenschmidt, K.-E., & Schnell, R. (2000). New biogas generator for generating biogas and acting as a gas storage vessel, incorporates the gas storage vessel as an integral part (Patent Núm. DE:19908351:A1). En Patent (DE:19908351:A1).
- [17] Englert, G. E., & Müller, I. L. (1996). The corrosion behaviour of mild steel and type 304 stainless steel in media from an anaerobic biodigester. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 37(3–4), 173–180. [https://doi.org/10.1016/s0964-8305\(96\)00019-4](https://doi.org/10.1016/s0964-8305(96)00019-4)
- [18] Efrati, O. M., Teller, Y., Lanzer, E., & Shoham, Z. A. K. (2019). Lightweight appliance with exoskeletal support respective kit-of-parts and method for production of biogas and liquid fertilizer (Patent Núm. 2019003075:A1). En World Patent (2019003075:A1).
- [19] Hewitt, J., Holden, M., Robinson, B. L., Jewitt, S., & Clifford, M. J. (2022). Not quite cooking on gas: Understanding biogas plant failure and abandonment in Northern Tanzania. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165(112600), 112600. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112600>
- [20] Rodriguez, M. J. M. (2021). Scalable biodigester plant for generating biogas from livestock liquid manure (Patent Núm. 20210292694:A1). En US Patent (20210292694:A1).
- [21] Sánchez, F. C. (2015). In-line biodigester or continuous mixing tunnel for biogas production (Patent Núm. ES:2529380:B1). En Patent (ES:2529380:B1).

- [22] Venegas Venegas, J. A., Espejel García, A., Pérez Fernández, A., Castellanos Suárez, J. A., & Sedano Castro, G. (2017). Potencial de energía eléctrica y factibilidad financiera para biodigestor-motogenerador en granjas porcinas de Puebla. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(3), 735–740. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i3.47>
- [23] Pérez-Espejo, R. H., & Cervantes-Hernández, G. I. (2018). Estrategias de mitigación. El programa de biodigestores en Yucatán, México. *Península*, 13(2), 235–262. <https://doi.org/10.22201/cephcis.25942743e.2018.13.2.65849>
- [24] Silva, J. B. da, Oliveira - Porto, I., Alencar, B. R. A., Santos Júnior, E. P., Amaral, D. R. do, do Valle, D. S. G. M., de Abreu, Í. B. S., Silva, S. P. da, Silva, A. F., de Moura, R. S., Carvalho, M., Antonino, A. C. D., Sales, A. T., Dutra, E. D., & Menezes, R. S. C. (2025). Small-scale biodigesters in a tropical semi-arid region: Impacts on emissions and water, energy and food security. *Energy Nexus*, 20(100602), 100602. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100602>
- [25] Pal, S., Bello, A., Muratova, E., & Chekanov, A. (2025). A review of the materials utilized in the design and fabrication of biogas digesters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 211(115167), 115167. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115167>
- [26] Kim, T., Kim, Y., & Park, J. (2026). Biogas-integrated liquid air energy storage system enabling negative carbon emissions and high energy efficiency. *Energy Conversion and Management*, 349(120919), 120919. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120919>

