

## **SISTEMAS MECÁNICOS PARA BIODIGESTORES RURALES Y APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS**

**Ing. Mario Pelissero**, UTN.BA, marioalbertopeli@gmail.com

**Ing. Néstor Ferré**, UTN.BA, nesferre@gmail.com

**Ing. Federico Gallo**, UTN.BA, fgallo@frba.utn.edu.ar

**Ing. Antonella Aguirre**, UTN.BA, anto.aguirre.27@gmail.com

**Micaela Alberti**, UTN.BA, ms.alberti.3@gmail.com

**Federico Dinova**, UTN.BA, alejodinova@gmail.com

**Lucia Peticaro**, UTN.BA, lpeticaro@est.frba.utn.edu.ar

**Federico Soley**, UTN.BA, federico.soley@gmail.com

**Jonatan Furlanetto**, UTN.BA, jonifurla@gmail.com

### **Resumen**

Esta investigación se basa en el desarrollo de innovaciones tecnológicas para hacer más eficiente la producción de biogás, para ello se desarrollaron sistemas para mejorar la homogeneización de los sustratos y el control automático de la temperatura dentro del biodigestor, además de la utilización de filtros para la purificación del biogás. Estos desarrollos son de baja demanda energética, de simple aplicación y de costos reducidos; esto permitirá extender su implementación incluso en lugares donde no existe el suministro de la energía eléctrica por tendido de cables.

La idea a futuro es la de actuar como generadores de energía eléctrica para el mismo establecimiento rural y zonas aledañas.

***Palabras clave*** — Biodigestión, Energías Alternativas, Renovables, Biomasa, Mecánica.

## **1. Introducción**

El agotamiento de los combustibles fósiles, el cambio climático y la creciente importancia del cuidado del medio ambiente han sentado las bases para el desarrollo de las energías renovables en todo el mundo, esto mismo se está replicando en nuestro país. El avance científico-tecnológico ha permitido el desarrollo de nuevos sistemas y materiales que dan lugar a que las energías renovables resulten una fuente alternativa confiable.

Esta problemática impulsó el estudio de fuentes de energía que reemplacen los habituales combustibles derivados del petróleo, cuya extinción está prevista para este siglo. Entre los recursos energéticos renovables, se cuenta con una fuente de energía explotada durante las penurias económicas y energéticas producidas durante y después de la última guerra mundial. Se trata del gas del estiércol y de los pantanos, esta mezcla de gases se produce por fermentación de las heces animales y además de la biomasa proveniente en general de los residuos agrícolas. Por su origen biológico se lo conoce mundialmente como biogás, es una mezcla de gases que contiene: metano (50 a 70%), anhídrido carbónico (30 a 45%), hidrógeno (1 a 3%), oxígeno (0,5 a 1%), otros gases (1 a 5%) y vestigios de anhídrido sulfuroso [1]. El proceso de fermentación anaeróbica que produce el biogás también genera un producto semisólido residual que resulta ser un buen fertilizante orgánico de mayor calidad y contenido de nitrógeno que el estiércol fresco y que puede ser utilizado tal cual o constituir un compost con residuos vegetales. El biogás se ha convertido en una alternativa energética en establecimientos rurales de magnitud en los países desarrollados; sin embargo, la intención es que pueda replicarse en poblaciones rurales de pequeño porte que son las más numerosas y de escasos recursos económicos que además carecen de la provisión de energía convencional. Es así como ha tomado un gran impulso sobre todo en Asia, en países como China e India, donde ya hay cerca de 500.000 plantas del tipo familiar instaladas y funcionando a pleno [2].

En la Argentina el 1,2% de la población rural (484.816 habitantes, según fuentes del censo 2010) no dispone de acceso al Sistema Interconectado Nacional (SIN), esto acarrea problemas para la implementación de los avances tecnológicos ligados a los sistemas eléctricos de energía y limita su desarrollo. No obstante, disponen de importantes recursos en biomasa de origen animal y vegetal, se cuenta entonces con materia proteica, celulosa, azúcares, almidones y aceites. Esta materia prima es la base del proceso de fermentación, el cual resulta ser una combinación de fenómenos fisicoquímico-biológicos muy complejos. La fermentación metanogénica es el proceso por el cual se obtiene biogás.

El biogás se combustiona con el objetivo de generar energía para ser aprovechada por la población rural, el CO<sub>2</sub> resultante de esta combustión es 20 veces menos contaminante que el CH<sub>4</sub> el cual se libera habitualmente durante la descomposición de las heces y biomasa vegetal.

Debido a estas problemáticas es esencial desarrollar tecnologías alternativas de generación de energía. El presente trabajo busca poner de manifiesto el conocimiento existente y plantear soluciones accesibles al sector rural para que el uso de la biodigestión se vuelva tentadora para los productores del sector rural; logrando así reducir la contaminación, generando productos secundarios con valor económico además de la producción de metano y su consecuente transformación en energía.

## **2. Materiales y Métodos**

La biomasa como los residuos de la cocina, restos vegetales y animales, aguas servidas junto con las heces pueden ser utilizadas en la fermentación anaeróbica (ausencia de oxígeno). Las bacterias consumen el carbono y transforman los compuestos nitrogenados como resultado se produce el biogás o gas de los pantanos. La materia prima se mezcla con agua, se cierra la boca de carga y comienza el proceso de digestión o sea la fermentación anaeróbica. Al cabo de un tiempo, comienza la generación de gases. Estos gases se van acumulando en la parte superior del digestor, su presencia se detecta mediante el incremento de la presión que se registra mediante un manómetro. Junto a la boca de carga se encuentra también una válvula para dar salida a los gases y dan lugar a su utilización. Un factor muy importante en el funcionamiento de la digestión es la relación C/N, es decir la cantidad de carbono respecto de la cantidad de nitrógeno (Barra, y Szockolay, 1988) Los alimentos principales de las bacterias anaeróbicas son el carbono (en la forma de carbohidratos) y el nitrógeno (proteínas, nitratos y compuestos amoniacales). El carbono se utiliza para obtener energía y el nitrógeno como parte de la estructura celular de los microorganismos. Esas bacterias utilizan carbono con una rapidez treinta veces mayor que el nitrógeno. Una relación C/N de 30 (30 veces más carbono que nitrógeno) permitirá que la digestión se lleve a cabo a un ritmo óptimo, siempre y cuando las condiciones sean favorables. En cuanto a la temperatura, para que las bacterias actúen con la mayor eficiencia deberá rondar los 36°C. La producción de gases puede producirse en dos rangos de temperaturas: de 29,4 a 40,5 °C y de 48,8 a 60 °C. El digestor va a funcionar en el rango de menor temperatura. A las bacterias que se desarrollan en las temperaturas más elevadas se las llama bacterias termofílicas (Macola, 1995). Con relación al pH, durante la fase inicial denominada ácida que puede durar 2 semanas, el pH resulta alrededor de 6, en esta condición se produce una gran cantidad de CO<sub>2</sub>. Conforme prosigue la digestión se produce menos CO<sub>2</sub> y más metano y el pH se eleva lentamente hasta llegar a un valor entre 7 y 8 (básico)

### **2.1 Sistemas Mecánicos**

#### **2.1.1 Control de temperatura**

Mediante la aplicación de microcontroladores electrónicos, se abordó la problemática del control de los procesos de producción del biogás, se utilizó para ello un sistema lógico programable. A fin de lograr los objetivos planteados, se procedió a realizar un análisis de la situación inicial del prototipo, determinando las variables relevantes a controlar del proceso, seleccionando y presupuestando los sensores a utilizar, y realizando la selección de los actuadores a fin de mantener los parámetros dentro del rango de óptimo de producción del biodigestor.

A continuación, se procedió a diagramar y llevar a cabo la instalación eléctrica, dimensionando los elementos necesarios y respetando las medidas de seguridad correspondientes.

Los elementos electrónicos utilizados son:

- Microcontrolador *Arduino due*
- Display 16x2
- Dos sensores de temperatura *DS18B20 one wire*
- Reles a fin de controlar el funcionamiento de la bomba de circulación y la resistencia eléctrica que calefacciona el fluido de intercambio de calor

En la siguiente figura se puede apreciar las conexiones de los sensores, actuadores y el microcontrolador:

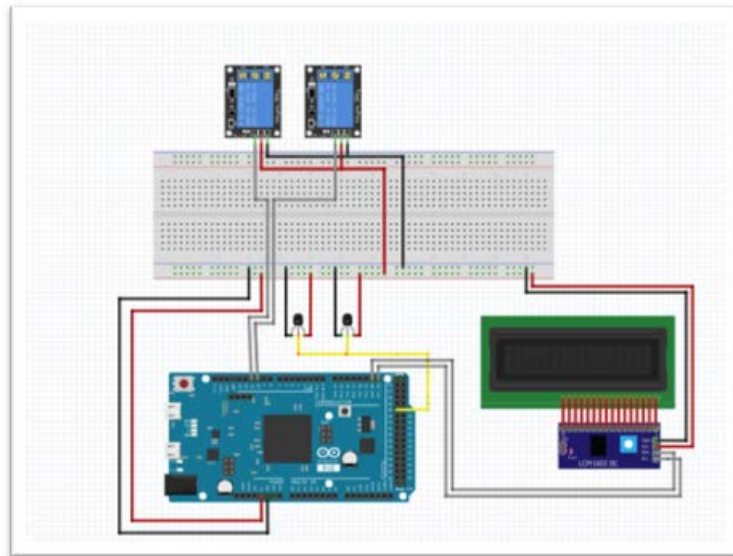


Figura 1: Esquema de conexionado de la placa Arduino con sensores y display.  
Fuente: elaboración propia.

La relevancia de la presencia de microcontroladores se basa en que permiten mantener el biodigestor en la temperatura de trabajo adecuada (rango mesofílico 20-40°C) lo que garantiza mejorar el rendimiento del prototipo y un aumento del caudal de biogás generado. Además, pueden obtenerse las curvas de calentamiento dentro del biodigestor, que complementadas con los análisis previos del sustrato (entre otros, calorimetría y porcentaje de materia seca) permitirán mejorar los parámetros de transmisión de calor.



Figura 2: Conexión real de la placa Arduino. Control electrónico para el prototipo.  
Fuente: elaboración propia.

### **2.1.2 Agitación**

Es importante contar dentro del digestor con un sistema que produzca una buena homogeneización de las materias primas, esto permite que:

- Se generen condiciones químicas, físicas y biológicas uniformes en el interior del digestor; siendo el objetivo más importante el de lograr que la temperatura se mantenga constante.
- La materia prima que ingresen al digestor se mezcle íntimamente con los productos que se están procesando.
- Que el biodigestor mantenga el máximo volumen activo, procurando evitar la formación de espumas y el ingreso sustancias minerales ajenas al proceso.
- A los efectos de minimizar los efectos adversos de las sustancias tóxicas que hubieren ingresado o se hubiesen generado durante la fermentación se requiere una buena agitación.

A los efectos de procurar una buena condición de trabajo se debe mantener agitado el contenido del digestor; para ello se debe recircular en forma adecuada las materias primas; de esta forma se evitará variaciones en los parámetros característicos. Así, se crea un entorno homogéneo dentro del digestor a la vez que se eviten fenómenos de sedimentación o estratificación y se evitará la acumulación de sustancias extrañas como fibras. Con una buena agitación se minimizará la sedimentación de las arenas en el fondo del digestor y la acumulación de las espumas en la parte alta del mismo.

Esta recirculación permite mantener homogéneo el sustrato a fin de favorecer a la transformación metanogénica, con esto se evita la formación de costras en la superficie del sustrato, estas costras impiden que el biogás pase del seno del sustrato a la parte superior del digestor (cámara de gas), esta innovación da como resultado apreciable mejora en la eficiencia del biodigestor [5].

El grupo de trabajo definió este tema como una de las prioridades a trabajar y decidió diseñar y fabricar una hélice ad-hoc. Como ventajas del sistema con hélices es un buen mezclado vertical y una mínima formación de espumas. Como inconvenientes hay que tener en cuenta que son sensibles al nivel del líquido, la corrosión y desgaste de las hélices, aunque el principal problema de estos sistemas de agitación es que están en el interior del digestor, esto dificulta su mantenimiento, siendo necesario vaciar el digestor para extraerlos en caso de avería.

Se realizó el diseño en software CAD 3D, y luego fue impreso en una impresora 3D, el material elegido fue PLA color negro, un espesor de capa de 0,2mm y una densidad de relleno de 50%. el uso de polímeros elimina una preocupación importante que es la corrosión de la pieza, y además la contaminación del sustrato por el uso de metales que pueden ser bactericidas.



Figura 3: Imagen renderizada de la hélice del agitador mecánico. Diseño propio.  
Fuente: elaboración propia.

### 2.1.3 Filtrado de Biogás



Figura 4: Conexión de salida de Biogás, con filtro de agua en solución de Bicarbonato de sodio  
Fuente: elaboración propia.

#### 2.1.3.1 Filtro de H<sub>2</sub>S

Dentro de las impurezas generadas en el proceso en los casos que la biomasa sea de origen animal se encuentran los derivados hidrogenados del azufre (ácido sulfhídrico y sulfuros ácidos (mercaptanos)). Dependiendo de la composición de la materia orgánica, el contenido de H<sub>2</sub>S puede variar entre 100 y 10.000 ppm. Estos componentes deben ser eliminados por ser altamente corrosivos en ambientes en presencia de combustión y se pueden detectar por su olor muy desagradable, para su eliminación se utiliza un filtro que contiene virutas de hierro, el hierro reacciona con los compuestos de azufre, generando sulfuro de hierro e hidrógeno.

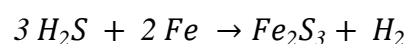
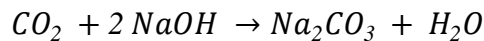




Figura 5: Filtro de H<sub>2</sub>S de viruta de hierro.  
Fuente: elaboración propia.

### 2.1.3.2 Filtro de CO<sub>2</sub>

El dióxido de carbono participa en un 30 a 45% en el biogás [6]. La presencia de dicho gas, no genera inconvenientes del tipo mecánico por ser un gas inerte; como contrapartida, el poder calorífico del biogás disminuye significativamente. Para eliminar el CO<sub>2</sub> existen varios métodos; se eligió el método más tradicional, en el cual se hace circular el biogás en una solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH). Considerando una producción de 120 litros de biogás (dato experimental), se generan 48 g de CO<sub>2</sub>. Realizando la proporción estequiométrica de la reacción resulta necesario utilizar 87 g de hidróxido de sodio para captar la totalidad del CO<sub>2</sub>.



Reacción de CO<sub>2</sub> con NaOH

### 2.1.4 Almacenamiento

Debido a que la producción de gas de un digestor anaeróbico es continua a lo largo de las 24 horas del día es necesario almacenar el gas cuando este no es consumido. La dispersión del consumo y su intensidad determinará el volumen de almacenamiento requerido. Por lo general el volumen de almacenamiento no baja del 50% de la producción diaria. El contenido de energía de 1 m<sup>3</sup> de biogás (60% CH<sub>4</sub> y 40% CO<sub>2</sub>) es aproximadamente 6 kWh/m<sup>3</sup>. Debido a que el gas en sí mismo constituye la forma más directa de energía se debe intentar almacenarlo; para ello existen varias formas posibles.

La forma más simple es almacenar el gas tal cual se obtiene, a baja presión, para ello se utiliza generalmente gasómetros.

Los gasómetros más difundidos son los del tipo plástico inflable. Este contenedor plástico puede cubrir el digestor en su parte superior como una campana o estar separado, almacenando a presión constante y volumen variable. Todos los sistemas tienen como presiones máximas 100 cm de C.A. encontrándose la media alrededor de los 35, presión a la cual funcionan correctamente los artefactos domésticos.

A fin de reducir el volumen de almacenaje necesario se puede comprimir el gas y almacenarlo a presiones medias (0,5 a 1,5 bar) y altas hasta 300 bar. Este tipo de almacenamiento demanda

un gasto extra de energía para comprimir el gas y además se lo debe purificar extrayendo el vapor de agua, el dióxido de carbono y el ácido sulfhídrico[7].

Para los prototipos construidos, se optó por almacenar el biogás en cámaras de rueda de auto; principalmente por un motivo económico, y por la flexibilidad que permite realizar lotes de diferentes producciones de biogás para luego ser enviado a realizar ensayos.



Figura 6: Cámara de auto utilizada para almacenamiento de Biogás.  
Fuente: elaboración propia.

### **3. Resultados y Discusión**

El primer paso debe ser caracterizar el sustrato que va a ser utilizado para la biodigestión, con la bibliografía consultada se procedió a realizar los siguientes ensayos.

#### **3.1 Ensayo Sustrato**

Una vez construido el biodigestor se comenzó por ensayar una muestra representativa del excremento vacuno que iba a ser utilizado como sustrato para determinar con exactitud el porcentaje de Materia Seca (%MS) de la muestra, y así determinar cuánta agua se debe agregar para llegar al 5% a 10% de MS necesaria para que sea un sustrato adecuado para el biodigestor.

Se utilizaron dos métodos para obtener el % de MS de la muestra, y luego se compararon resultados. Ambos fueron reproducidos en idénticas condiciones durante 5 repeticiones para validarlos.

##### **3.1.1 Ensayo de secado convencional**

Es un ensayo químico normalizado, donde se introduce una muestra orgánica en un horno convencional (a gas o eléctrico) se debe dejar durante 24hs a 105°C. Se pesa la muestra al inicio y al final del ensayo; con la diferencia de peso, se obtiene el % de MS.

##### **3.1.2 Ensayo de secado con horno Microondas**

Se tomó una muestra en un vaso de vidrio templado, se pesó y luego fue colocada en el microondas junto a un vaso de similares características del vaso anterior con agua. Se



sometieron a ambos vasos y sus contenidos durante 2 minutos a una potencia de 750w. Se extrajeron ambos vasos, se pesó la muestra y se repitió el procedimiento cambiando el agua hasta que el peso de la muestra fuese constante, el mismo se va reduciendo por la deshumidificación. Se necesitaron 5 repeticiones. De esa forma se llegó al mismo % de MS en ambos ensayos con la diferencia de que el primer ensayo se realizó en 24 hs y el segundo ensayo en 12 minutos. Con este método se validó el segundo ensayo.



Figura 7: Horno microondas durante el ensayo de secado  
Fuente: elaboración propia

### **3.1.3 Ajuste del porcentaje de Materia Seca (%MS)**

Si se quiere llegar al 5% de MS total en el sustrato, hay que agregarle agua, y utilizando regla de 3 simple se calcula la cantidad de agua necesaria a agregar.

El 20% de 1 Kg de sustrato es 0.2Kg (materia seca).

$$\alpha = 0,2 \times \beta$$

Entonces, 5% de solución total es 0.2 Kg

$$\alpha = 0,05 \times \gamma$$

$$\gamma = \beta + \delta$$

$\alpha$ : Peso de materia seca

$\beta$ : Peso sustrato

$\gamma$ : Peso de la solución

$\delta$ : Peso de agua a agregar

El 100% de solución total corresponde a:

$$(0.2 \text{ Kg} \times 100) / 5 = 4 \text{ Kg de solución.}$$

De la expresión anterior se deduce que por cada Kg de excremento habrá que agregar 3kg de agua.



Figura 8: Preparación del sustrato, previa carga al Biodigestor  
Fuente: elaboración propia

### 3.2 Ensayo Biogás

El ensayo fue realizado por la gente de INTI-Ambiente

Las concentraciones de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> se determinaron mediante una celda infrarroja a distintas longitudes de onda (precisión 3% de la lectura).

El O<sub>2</sub> con celda electroquímica interna, precisión: 1 % de la lectura.

Para el caso del H<sub>2</sub>S, mediante una celda electroquímica externa (con un límite de detección aproximado en 5 ppm).

El equipo utilizado fue el Biogás CDM Modelo: 11855, marca Landtec.

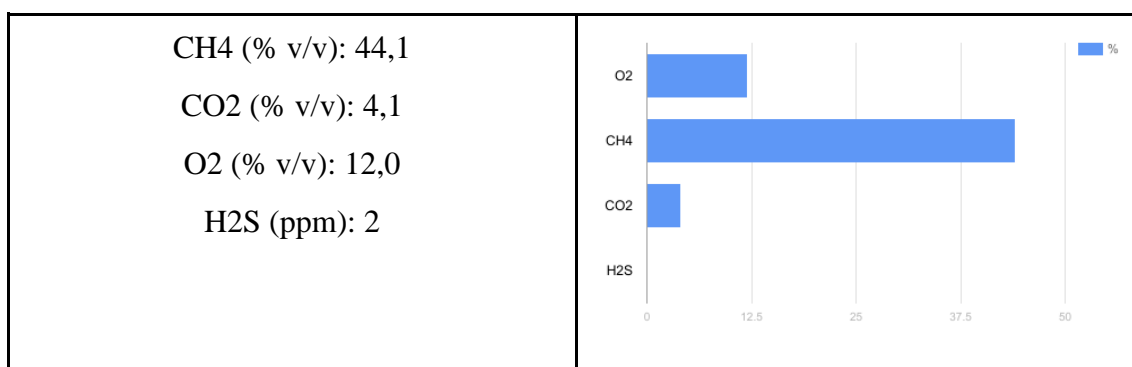


Tabla 1: Composición química del biogás  
Fuente: elaboración propia

#### **4. Conclusiones y recomendaciones**



Figura 9: Prototipo experimental en funcionamiento  
Fuente: elaboración propia

El prototipo de Biodigestor construido funcionó de manera satisfactoria y con resultados favorables. La experiencia fomentó el desarrollo de nuevos experimentos y metodologías de trabajo, las cuales le permitieron al equipo aprender e incorporar nuevos conocimientos. El porcentaje de metano que se obtuvo estuvo dentro del porcentaje esperado según consultado en fuentes bibliográficas. En cuestiones de diseño, se encontraron dificultades al momento de realizar la carga de sustrato, eso se puede mejorar ampliando el diámetro de la cañería de entrada.

Su uso, si bien fue pensado para investigación, permite ser escalado y reproducido para realizar una producción de Biogás de nivel industrial. Se espera a futuro realizar una prueba piloto trabajando en sector rural, realizando la instalación completa a un criadero de animales de campo.

#### **5. Referencias**

- [1] Lockett, W. (1997). Digestores de gas metano para obtener combustibles. The New Alchemy Institute West, 45-59.
- [2] Nitsch, J. y Rettich, S. (1993) Biogas, Nutzungsmöglichkeiten für Baden-Württemberg. Stuttgart, Deutschland, p.p. 20-31
- [3] Barra, O. A. y Szockolay, S. V. (1988) Basic Course of Renewable Energy Sources, Italian Ministry of Foreign Affairs, Rome, Italy. p.p. 20-31
- [4] CRESPO, Roberto J.; CASTAÑO, Jorge A.; CAPURRO, José A. Secado de forraje con el horno microondas: efecto sobre el análisis de calidad. Agricultura Técnica, 2007, vol. 67, no 2, p. 210-218.
- [5] SÁNCHEZ, Jesús: Optimización de la agitación de un digestor anaeróbico mediante mecánica de fluidos computacional. p. 19-23
- [6] Tipayawong, N., & Thanompongchart, P. (2010). Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S in a packed column reactor. Energy, 35(12), 4531-4535.
- [7] HILBERT, Jorge. Manual para la producción de biogás.p. 36