



SISTEMA DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD Y CANTIDAD DE BIOGÁS GENERADOS A TRAVÉS DE DIFERENTES TIPOS Y PROPORCIONES DE SUSTRATOS

Javier F. Dzikoski ^{*1}, Francisco Gonzales ², Héctor G. Lorenzo ³ y Manuel Cisneros ⁴

^{*1,2 y3} Facultad de Ingeniería– Universidad Nacional del Nordeste

Av. Las Heras 727 Resistencia Chaco Argentina

^{*1} correo-e: javidzik@yahoo.com.ar

² correo-e: 36197210@comunidad.unne.edu.ar

³ correo-e: hlorenzo@comunidad.unne.edu.ar

⁴ FACENA- Universidad Nacional del Nordeste

RESUMEN

Existe una gran cantidad de estudios realizados que buscan, por diferentes caminos, el procesamiento de los residuos orgánicos. Una alternativa para su aprovechamiento es su transformación en un recurso energético a través de la biodigestión. La cantidad y proporción de residuos orgánicos que pueden utilizarse es muy amplia, y la necesidad de llegar a un sustrato que maximice la producción de metano hace necesario el ensayo de diferentes mezclas. Con el objetivo de determinar la cantidad y calidad de biogás producido por diferentes sustratos, en la Facultad de Ingeniería de la UNNE, se diseñó, construyó y operó un sistema anaerobio de generación y almacenamiento de biogás.

El sistema posee un biodigestor, el cual se encuentra cubierto por una manta térmica que permite variar la temperatura del sistema de 30°C a 50°C. El biodigestor cuenta, en su parte superior, con válvulas, para salida del gas y la inserción de un sensor de temperatura. En la parte inferior se instaló una válvula para extraer muestras para medir el PH del sustrato. El gas generado se acumula en un gasómetro de 43,4 litros de desplazamiento de agua, el cual cumple con dos funciones, almacenamiento, previo paso por un filtro para la eliminación del Sulfuro de Hidrógeno (SH₂), y medición del volumen de biogás generado. Para el primer ensayo se utilizó una mezcla de estiércol bovino y Pistia stratiotes (repollito de agua), este último fue elegido debido a que dicha planta acuática es considerada, a causa de su proliferación, una plaga en los cursos de agua de la región.

Periódicamente se realizaron mediciones de producción y de porcentaje de CO₂ en el biogás. El volumen total producido fue de 310 litros.

Se ha obtenido un buen resultado con el sistema de medición, pero se deberían hacer nuevos ensayos con otras concentraciones para sacar mejores conclusiones.

Palabras Claves: Biodigestión, Biogás, Metano, Repollito de agua.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

En el Departamento de Mecánica de la Facultad de Ingeniería, en los últimos años, se han realizado diferentes actividades referidas al diseño de sistemas para biodigestión anaeróbica y tratamiento posterior del biogás, a modo de aprendizaje-entrenamiento de la operación de un biodigestor, y como parte de trabajos de Proyecto final de grupos de alumnos de grado. Dichas experiencias y su difusión, generó distintas consultas por parte de industrias de la región, en cuanto a posible aprovechamiento de algún residuo para su uso energético. Esta situación creó la necesidad de tener un sistema con la capacidad para analizar distintos sustratos, su facilidad para la digestión, su rendimiento y calidad del gas producido (calidad evaluada considerando el volumen de metano obtenido sobre el total de los gases producidos).

Luego de analizar distintas publicaciones, y referencias bibliográficas [1], se definió como objetivo diseñar e implementar un sistema discontinuo de digestión que permita, en un determinado lapso de tiempo, obtener, para un determinado sustrato, el volumen total y calidad del gas producido, en una situación de condiciones controladas de temperatura y evaluando la evolución del sustrato en su proceso de digestión. Es decir, se plantea el diseño y desarrollo de un sistema de ensayo, o banco de ensayos, con el fin de determinar capacidades de diferentes sustratos en condiciones controladas.

El sistema proyectado debe tener ciertas facilidades, considerando el hecho de que sería controlado por personal durante los días hábiles de la semana, y solo por la tarde, por lo que se debía acumular el gas en las cantidades que se producirían en los fines de semana, para su medición, y acumular una cantidad suficiente para poner en marcha una bomba calorimétrica.

2. SISTEMA DE ENSAYO PARA CARACTERIZACION DE SUSTRATOS

A continuación se describirán las distintas partes del sistema desarrollado e instalado en el laboratorio, (Taller del Departamento de Mecánica), el funcionamiento del mismo, la construcción y montaje de las partes intervinientes.

2.1. Biodigestor

Las dimensiones del digestor fueron seleccionadas tal que se obtenga un volumen de gas suficiente para las mediciones a realizar, que a su vez sea práctico, es decir, un volumen manejable de sustrato a nivel de laboratorio, con un diseño económico, fácil de cargar, descargar y limpiar. Considerando lo expuesto, se utilizó un tambor plástico de 200 litros, el cual cuenta con una tapa de 40 cm de diámetro. En dicha tapa se montaron dos válvulas, una



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

para salida del gas y la otra para montar a través de la misma un sensor de temperatura que ingrese hasta el nivel en que se encuentra el sustrato en el interior del digestor.

Para la toma de muestra de sustrato en digestión, se instaló una válvula de dos pulgadas a 15 cm del fondo del tambor.

Se realizó, previamente a su puesta en funcionamiento, una prueba de hermeticidad utilizando aire comprimido y se verificó sumergiéndolo en una pileta con agua.

Para controlar la temperatura del digestor se recubrió el mismo con una manta térmica comercial, y sobre ésta se colocó un aislante térmico, este último tiene el fin de minimizar las pérdidas de calor y lograr un mejor control de temperatura. La manta térmica posee un sistema de control y selección de temperatura, del tipo si/no, ajustable mediante un potenciómetro.

También es importante agitar el sustrato, ya que éste, al estar en reposo forma una capa en la superficie dificultando el paso del gas. En nuestro caso, esta agitación se realiza en forma manual, moviendo la totalidad del digestor por unos dos minutos por día, lo cual le da sencillez y confiabilidad al sistema.

2.2. Gasómetro

El gasómetro es el recinto donde se acumulará el biogás generado en el digestor. Consiste en un gasómetro con desplazamiento de agua, el cual cumple con dos funciones: almacenamiento, y medición del volumen de biogás generado.

Para la construcción del gasómetro se utilizó un tanque de un compresor en desuso que se reacondiciono para tal fin. El mismo tiene una capacidad de almacenamiento de 43,4 litros. En la parte superior se instalaron dos válvulas, una para el ingreso del gas proveniente del digestor y la otra para el consumo o extracción del gas para su análisis.

También se instaló una válvula en la parte inferior del gasómetro donde, por medio de una manguera, se comunica con el tanque de almacenamiento de agua que está ubicado al lado del gasómetro. Entre las dos salidas del tanque, por medio de una derivación en "T" se colocó una manguera tipo cristal vertical para medición del nivel de agua dentro del gasómetro mediante una regla, ubicada junto a dicha manguera, el volumen de gas acumulado o generado.

2.3. Filtro

Se instaló un filtro para la eliminación del Sulfuro de Hidrógeno (SH_2). Este gas, es producido por la descomposición de la materia orgánica, y al entrar en solución con el agua se denomina ácido sulfhídrico, que es altamente corrosivo, y en altas concentraciones es peligroso para las



personas. La cantidad presente en el biogás, ronda los $3\text{g SH}_2/\text{m}^3$ de biogás generado. Una de las formas más económicas para su eliminación, es mediante el proceso de absorción del SH_2 a partir de óxido de hierro. Por tal motivo, el filtro fue construido con un caño de PVC de un diámetro de 16 cm por 30 cm de largo donde se introdujo 900 gr. de viruta de hierro previamente oxidada.

2.4. Conjunto para medición y acumulación del gas

En la Figura 1 se observa el conjunto: digester, filtro, gasómetro y tanque de almacenamiento de agua; con sus conexiones y válvulas para su funcionamiento y operación. Dado que las tapas inferior y superior del gasómetro son semielípticas, se realizó para conocer el volumen en dichas zonas, una calibración previa, introduciendo volúmenes conocidos de agua y marcando en la escala a qué altura correspondían. En condiciones de operación, por simplicidad, se trató de trabajar siempre con las variaciones de alturas en la zona cilíndrica (zona de variación lineal).

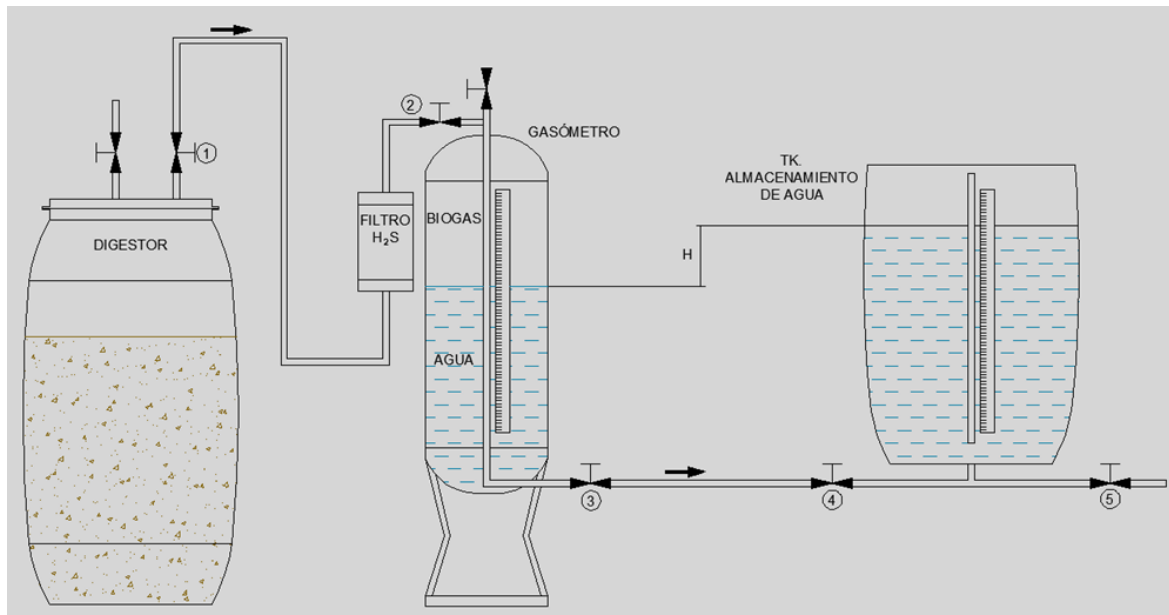


Figura 1. Diseño esquemático del sistema completo para el ensayo y caracterización de sustratos en procesos de biodigestión.

2.5. Sistema de medición y adquisición de datos de temperatura

Durante el ensayo se mide: la temperatura del ambiente en el recinto donde se encuentra el digestor; la temperatura dentro de la cámara de digestión; y también se obtiene el estado de la manta térmica (si/no). Previamente se había previsto instalar un sensor de temperatura dentro del digestor, para medir la temperatura real del sustrato, pero hubo dificultades a la hora de



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

armar dicho sensor, por el tema de hermeticidad del digestor, y del sensor mismo, y para evitar más demoras, se resolvió medir entre la pared externa del digestor y la manta térmica.

Los datos se obtuvieron mediante circuitos diseñados y desarrollados específicamente para este proyecto. Para la adquisición de estas 3 señales se utilizó un micro controlador ATmega 328, el cual adquiere la señal proveniente de los diferentes sensores mediante sus canales de conversión analógica/digital (ADC) de 10 bits de resolución.

.Los datos medidos, compuestos por dos temperaturas y el estado de la manta térmica, se almacenan en una memoria SD, ordenadamente por fecha y hora. La memoria es de 2 gigabytes, con capacidad de almacenamiento suficiente para obtener datos minuto a minuto durante todo el período de medición.

La transformación o traducción de los datos de temperatura en tensión es realizada por un sensor de temperatura integrado (LM35). La calibración de estos sensores de temperatura se realizó en un baño termostático donde se obtuvo la ecuación de su respuesta. Esta ecuación se implementó por software, en donde simplemente se multiplicó por un factor de escala la medida obtenida por los ADC.

Los datos temporales fueron generados mediante un reloj de tiempo real RTC (Real Time Clock), el circuito utilizado fue un DS3234. El mismo funciona con un cristal de 32.768 kHz.

El estado de la manta térmica (si/no) se infiere de la tensión presente entre los bornes de una resistencia shunt, la cual presenta una tensión de 50mV al circular una corriente de 5A con una precisión de 0,5%.

La lectura de los datos de temperatura se lleva a cabo 10 veces por minuto para posteriormente ser promediado y así obtener un único valor representativo de las muestras. Luego se lee el estado de la manta térmica para contar con los 3 datos de interés en el ensayo. Para generar un dato a grabar en la memoria SD se agrega además el día y la fecha de cada uno de estos eventos que estarán espaciados 1 minuto entre todos ellos.

La Figura 2 representa el esquema de conexión de los diferentes componentes del sistema, en donde observamos el micro controlador (328), los sensores de temperatura (LM35), el módulo encargado de generar los datos temporales (RTC Module DS3234) y la tarjeta de memoria en donde se almacenan los datos (SDCARD).



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

de digestión rápido, dado que este aporta las cepas de bacterias metanogénicas, que garantizan un arranque inmediato de la producción de biogás [4]. Se procedió en primer lugar a moler los repollitos de agua para que la descomposición sea más rápida. Para proceder a su digestión, se preparó una mezcla con el estiércol, y luego se cargó el digestor con dicha mezcla como sustrato.



Figura 3. Foto que muestra el aspecto del repollito de agua (*Pistia stratiotes*), así como una foto del Rio Negro (Chaco) donde se percibe el grado de proliferación de esta especie de planta acuática.

El contenido de Sólidos Totales (ST) que tiene el sustrato, y por consiguiente la humedad son un factor importante a tener en cuenta debido a que da una idea de la cantidad de agua disponible para la hidrólisis, la cual es una de las limitantes dentro del proceso de digestión. Por su parte, los Sólidos Volátiles (SV), dan una idea de que fracción puede ser convertida a gas a través de la biodegradación.

La determinación de los sólidos totales y volátiles en este caso, se realizó tomando una muestra de los repollitos de agua, colocándolo en una capsula de porcelana y siguiendo el procedimiento especificado en la Norma ASTM D-3173 y 3175. Utilizando las Ecuaciones (1) y (2), se calculan los sólidos Totales y los volátiles sobre la muestra húmeda de repollitos de agua.

$$\%ST = \frac{P_3 - P_1}{P_2 - P_1} \cdot 100 \quad (1)$$

$$\%SV = \frac{P_3 - P_4}{P_2 - P_1} \cdot 100 \quad (2)$$

Dónde: P_1 es el peso de la capsula vacía; P_2 peso de la muestra húmeda en la capsula; P_3 el peso de la muestra seca en la capsula; P_4 el peso de lo que quedó en la capsula luego de destilar los volátiles.

Los resultados de la carga lo vemos en la Tabla 1:



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Tabla 1. Cantidades y composición del sustrato

Cantidad (kg)	Material	ST (%)	ST (kg)	SV (%)	SV (kg)
13	Repollito de agua	10,36	1,37	5,98	0,777
6,5	Estiércol Equino	16	1,04	13	0,845
96,5	Agua	-	-	-	-
116	Total	2,06	2,387	1,40	1,622

Se cargó el digestor con dicho material, se lo cerró, y se conectó la manta y el sistema de medición de temperaturas.

3.2. Producción de Gas

Para la medición del volumen de gas, se utilizó la escala del gasómetro (Figura 1), que indica el nivel de gas. Con esa lectura se puede efectuar el cálculo del volumen en forma directa, previa calibración.

El procedimiento de medición del volumen de gas, fue medir la altura H entre el gasómetro y el tanque de almacenamiento de agua, cada 2 días aproximadamente, y ciertos días, cuando la lectura era diferente, se realizó el procedimiento de calibración [5]. Cada medición fue de lectura de H y de CO₂, y posterior venteo del gas, hasta dónde comienza la zona cilíndrica en el gasómetro. Esto se repitió hasta el día 15, donde sistemáticamente se fueron anotando los valores del volumen del gas generado y luego venteado, después del día 15 bajo la producción de gas, por esta razón, a partir del mencionado día se fue acumulando el gas, hasta la finalización del ensayo. Se ve en la Figura 4 la evolución del volumen producido a lo largo de 30 días de ensayo.

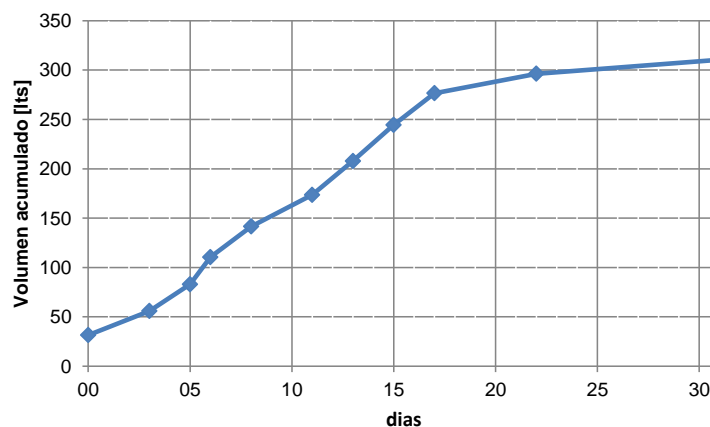


Figura 4. Volumen de biogás acumulado durante un mes de ensayo.



3.3 Medición de la calidad del Gas

Al biogás generado, se lo analizó para determinar el porcentaje de CO₂ presente en el mismo. Se supuso que, con esta medición, obtenemos por diferencia, el porcentaje el Metano producido y, a través de este dato la capacidad energética del gas producido. Para tal fin se utilizó un aparato D'Orsat, equipo basado en la absorción de gas por el proceso de quimisorción con una solución de KOH (hidróxido de potasio). Con este aparato, se obtiene de forma directa el porcentaje de CO₂ presente en el biogás. El reactivo para absorber el CO₂ es, como dijimos, el Hidróxido de Potasio, en este caso en una disolución de 50 gr. KOH, completando con agua destilada hasta 125 ml. Esto absorbe CO₂ hasta en 20 veces su volumen [5].

En la Tabla 2 se ven las lecturas realizadas periódicamente, y su evolución temporal.

Tabla 2: Evolución de la calidad del gas y del sustrato

días	CO ₂ (%)	PH (-)
5	28%	6,7
6	27%	6,7
8	29%	6,8
11	21%	6,8
13	27%	6,9
15	26%	6,9
17	25%	6,9

3.4. Medición del pH del sustrato

Conjuntamente a las mediciones de CO₂, se realizaron extracciones del sustrato y se midió PH y temperatura a las muestras. Se utilizó un Tester de pH Hanna portátil. El mismo se lo calibra previamente con las soluciones de calibración, para garantizar que las lecturas son confiables. Se cuenta con soluciones patrones de pH 4,01 y 7,01, por lo que los valores medidos se encuentran dentro de esos márgenes calibrados. Las lecturas y su evolución se pueden ver en la Tabla 2. Los valores de pH se mantuvieron en valores aceptables para una digestión estable.

3.5. Medición de la Temperatura

El proceso de digestión se realizó en un intervalo de temperaturas comprendido entre 40°C y 47°C con oscilaciones entre máximos y mínimos de aproximadamente 5°C (Figura 5). En el décimo día de ensayo existió una variación de los valores de consigna en el potenciómetro de la manta, situación que ocasiono un aumento de temperatura con una consiguiente disminución en la producción del biogás. Este hecho fue corregido y mostró la necesidad de un control más



adecuado de la temperatura, que evite estas situaciones y disminuya las oscilaciones en la regulación de temperatura.

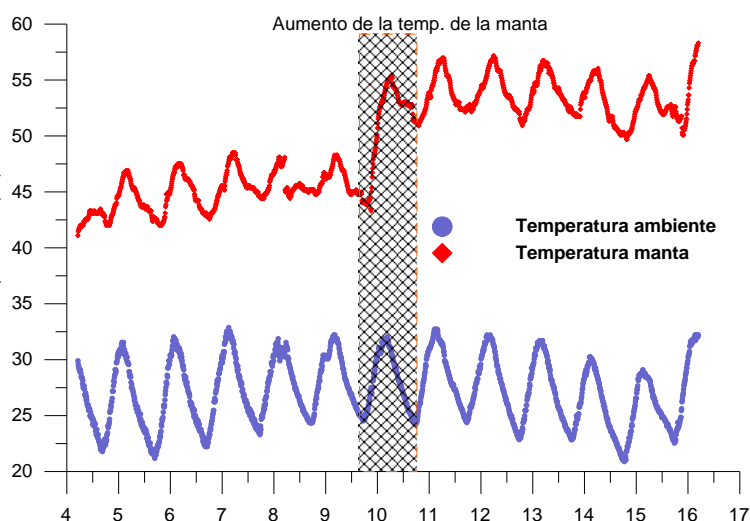


Figura 5. Temperatura ambiente y del biodigestor durante los 17 primeros días de ensayo

4. CONCLUSIONES

El volumen total producido en 31 días fue 310,4 lts de biogás ($0,3 \text{ m}^3$), que para la cantidad de sólidos Totales puestos a digerir nos da una tasa de producción, de $0,19 \text{ m}^3/\text{kg ST}$. El valor de referencia medido para mezcla de Camalote y estiércol, que se puede producir por la digestión discontinua, en un tiempo aproximado un 50% mayor al ensayo nuestro, aproximadamente un 100% superior, en rangos de temperaturas no muy diferentes a la nuestra. Si bien el material digerido es diferente (*Eichhornia crassipes* con estiércol), faltaría hacer ensayos más prolongados, con análisis posterior de la cantidad de ST y SV del sustrato al momento de parar el ensayo.

Por otro lado, deberíamos medir la temperatura del sustrato durante su evolución, y mejorar el controlador de temperatura, reemplazando el sistema Si-NO que tiene un span que genera las oscilaciones en temperatura, por un control por modulación del ancho de pulso sobre la manta.

El sistema de medición de volumen de gas, y calidad, demostró ser eficiente y robusto, aunque también se pueden hacer mejoras para otro ensayo, como hacer la calibración de la ecuación de transformación de altura en volumen, en un trabajo previo, así al iniciar el ensayo se trabaja directamente con la ecuación.

Dado el bajo porcentaje de CO_2 en el gas producido, se debería establecer un procedimiento de constatación, si no hay una absorción importante en el agua utilizada para sello en el gasómetro, que esté falseando las lecturas.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

El trabajo que se debería realizar a futuro es una serie de ensayos con distintos sustratos, y repetir la composición para tener mayor certidumbre en los valores obtenidos.

5. REFERENCIAS

- [1] V. Riera y Otro, Producción Anaeróbica de Biogás Aprovechamiento de los Residuos del Proceso Anaeróbico, IIDEPROQ, La Paz, 2004.
- [2] K. Lindsey y H.-M. Hirt, Use Water Hyacinth, 1999.
- [3] A. Bhattacharya y P. Kumar, Water Hyacinth as a Potential Biofuel Crop, EJEAFChe, Vol.9-112-122, 2010.
- [4] J.C. Rodríguez R, y Otros, Resultados Experimentales sobre la producción de Biogás a través de la Bora y el estiércol de Ganado, Agronomía Tropical, Vol 47-441-455, Venezuela, 1997.
- [5] F. Urieta Aguado, Diseño y Construcción de un Sistema Orsat modificado para el Análisis de Biogás, Universidad Carlos III, Madrid, 2010

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a todos los que brindaron su ayuda, como ser al GER de la FACENA y el Laboratorio Taller de Ingeniería Mecánica, sin hacer nombres en particular, aunque sabemos que esos nombres en particular, existen.