

## **METODOLOGÍA DE BAJO COSTO PARA LA CUANTIFICACION DE BIOGAS EN BIODIGESTORES DE LABORATORIO.**

M. Menna<sup>1</sup>, J. Branda<sup>2</sup>, G. Murcia<sup>2</sup>, E. Garín, G. Belliski, E. Moschione.  
Grupo de Estudio de Energías Alternativas y Ambiente (GEEAA) – Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP)  
Av Juan B. Justo N° 4302 Mar del Plata - Tel. 0223-4816600 – Fax 0223-4810046  
e-mails: [mamenna@fi.mdp.edu.ar](mailto:mamenna@fi.mdp.edu.ar), [jbranda@fi.mdp.edu.ar](mailto:jbranda@fi.mdp.edu.ar), [gimurcia@fi.mdp.edu.ar](mailto:gimurcia@fi.mdp.edu.ar)

**RESUMEN:** Este trabajo es parte de un proyecto integral que busca dar respuesta a la problemática de la gestión actual de los residuos sólidos urbanos de la comunidad de Mar del Plata. Abarca la etapa de construcción y puesta a prueba, para una posterior automatización, de un gasómetro de una Planta Piloto de generación de biogás de pequeña potencia, que permitirá evaluar las potencialidades energéticas de recuperación de metano de la fracción orgánica de distintos residuos generados en la ciudad. El prototipo construido en el marco del Programa de Mejoramiento de la Enseñanza en Ingeniería, también tiene funciones didácticas y demostrativas. Se presentan las características constructivas y facilidades de uso del gasómetro, para la medición del biogás generado a partir de residuos sólidos orgánicos, para su posteriormente almacenamiento y conversión a energía eléctrica.

**Palabras clave:** cuantificación de biogás, tratamiento biológico, valorización de residuos sólidos, educación ambiental.

### **INTRODUCCION**

En los estratos superiores de la jerarquía de la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU), luego de la minimización, se encuentran tratamiento y valorización de los mismos (Tchobanoglous et al, 1998).

La recuperación y aprovechamiento de metano, gas de efecto invernadero (GEI), componente combustible del biogás generado por degradación anaeróbica de la fracción orgánica de los RSU, es una actividad prioritaria de los mecanismos de desarrollo limpio (MDL), enunciados por la Convención para el Cambio del Clima de la Organización de las Naciones Unidas, con el propósito de fomentar la reducción de emisiones de GEI. A su vez, esta actividad está prevista en la Estrategia Nacional de Gestión Integral de los RSU, que promueve la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.

La composición porcentual de las fracciones de interés, que deben ser minimizadas en la disposición final de residuos sólidos domiciliarios (RSD) de la ciudad de Mar del Plata, ha sido determinada (Menna M et al, 2001) y la fracción orgánica de los mismos ha sido caracterizada físico-químicamente (Plaza G. et al., 1999). Habiendo realizado, el grupo de trabajo, experiencias en escala laboratorio de tratamiento aerobio de la misma, combinando tres tipos de residuos sólidos abundantes en la ciudad: la fracción orgánica de los RSD, restos de poda, y barros cloacales retenidos en el tratamiento primario de efluentes en la Planta de Camet (Menna et al, 2004).

En esta oportunidad se trabaja en los aspectos de recuperación energética de los residuos, con vista al tratamiento anaeróbico de la fracción orgánica de los RSU del Partido de Gral. Pueyrredon, y se lo hace atendiendo fundamentalmente a dos aspectos demandantes, el tratamiento de los residuos con recuperación neta de energía y la incorporación de ingeniería local en automatización del proceso, priorizando el interés didáctico de distintas asignaturas de carreras de grado y postgrado.

El diseño de la Planta Piloto y su automatización en la medición del volumen generado, mediante la co-financiación por parte del proyecto de investigación de la Universidad Nacional de Mar del Plata y el Programa de Mejoramiento de la Enseñanza en Ingeniería, compatibiliza los intereses de investigación con los intereses académicos de la universidad.

---

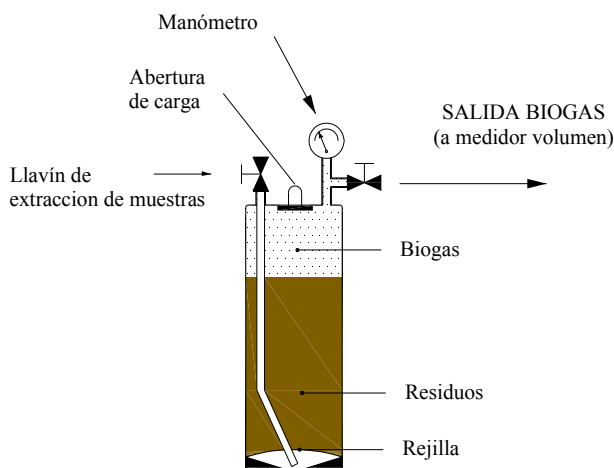
<sup>1</sup> Docente investigador UNMDP, SN CAT III. Maestrando Ingeniería Ambiental.

<sup>2</sup> Docente investigador UNMDP, SN CAT IV. Maestrando Ingeniería Ambiental.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 1. Biodigestor

Se diseñó la Planta Piloto Didáctica para la generación de biogás en base a la reutilización de recipientes de acero inoxidable que originalmente se utiliza para almacenar y vender sueltas bebidas gaseosas sin alcohol. Dicho recipiente de 19 litros de capacidad, está diseñado para soportar presiones muy superiores a las que se obtendrán por la fermentación anaeróbica de la materia orgánica. El recipiente posee en su parte superior una abertura de unos 12 cm de diámetro con una tapa con aro de goma, que cierra herméticamente con mayor seguridad cuanto mayor es la presión interna. También tiene dos salidas en la parte superior. Una de ellas se utilizó como punto de medición de presión y salida de biogás, mediante la adaptación en "T" de un manómetro de alcance  $1 \text{ kg/cm}^2$  y una llave de uso en instalaciones de gas. La otra salida, que mediante un caño cilíndrico de 0,75 cm de diámetro, comunica con el fondo del recipiente, se le acopló otra llave para utilizarlo como extractor de muestras para analizar los parámetros básicos de funcionamiento y controlar el proceso anaeróbico. Para evitar obstrucción de este caño de extracción de muestras, se incorporó una rejilla adaptada a la forma del fondo del recipiente con una malla doble de 1 mm. La figura 1 ilustra este dispositivo.



a) Esquema biodigestor



b) Detalles externos

Figura1: Recipiente de acero inoxidable adaptado como reactor anaeróbico.

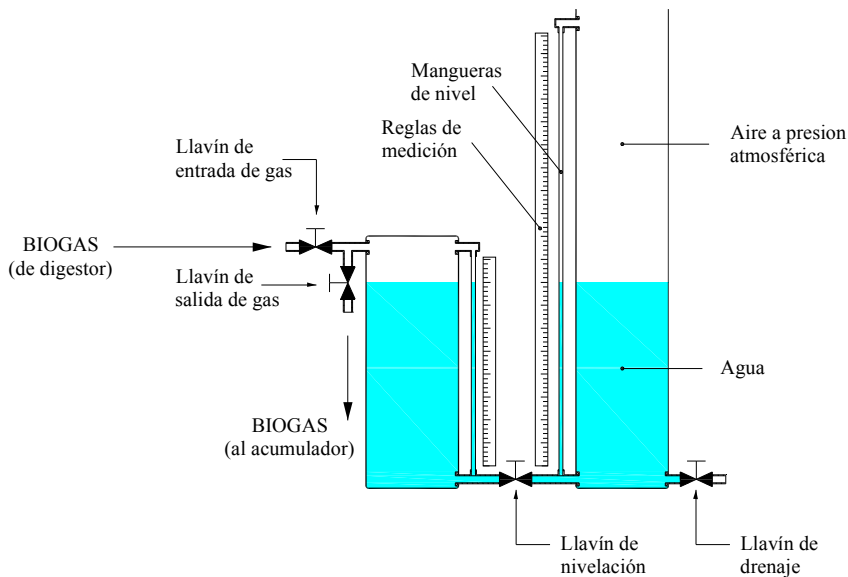
### 2. Medición de volumen de biogás generado. El gasómetro:

Se evaluaron dos modelos de gasómetro. El modelo A, utiliza el principio de desplazamiento de agua, mientras que el modelo B, es la conocida "campana flotante".

Se buscó que la capacidad de almacenamiento de biogás fuera tal que permitiera almacenar la generación de 48 horas, evitando el aumento de la presión interna a niveles perjudiciales para el desarrollo óptimo del proceso anaeróbico. Por tal razón, para un reactor de 19 litros, evaluamos como conveniente un gasómetro de ese mismo orden de capacidad.

Se presenta en este trabajo el modelo A, que consta de dos caños de PVC de 0,20 m de diámetro y 0,4 mm de espesor, del tipo de los utilizados en la construcción de desagües. Se dispusieron verticalmente, uno de ellos de 0,50 m de altura y cerrado en ambos extremos y el otro de 1 m de altura, abierto en la parte superior, alcanzando aproximadamente 15 y 30 litros de capacidad respectivamente. Para visualizar el desnivel de agua provocado por la presión del biogás, se adaptaron en cada uno de estos tubos verticales, una manguera transparente de PVC cristal, y dos cintas métricas para la observación y medición de dicho desnivel.

Ambos tubos dispuestos a la par, se comunican por sus extremos inferiores, en configuración vasos comunicantes, conformando un barómetro de tubo abierto, por lo que además del volumen, el dispositivo proporciona en todo momento el valor de la presión interna del reactor. La Figura 2, muestra un esquema del gasómetro construido.



a) Esquema gasómetro

b) Vista externa

Figura 2: Esquema del medidor de volumen de biogás y equipo construido.

El tubo de 0,50 m, dispone en su parte lateral superior, una entrada/salida de biogás en “T”, que permite el ingreso de biogás generado en el reactor y la extracción de biogás para su almacenamiento y uso. La comunicación entre los tubos verticales, es en sus laterales inferiores materializada mediante un tubo de PVC cristal, con una llave intercalada para permitir o inhibir la circulación del agua entre los mismos. El tubo de 1 m de altura, dispone de una llave de drenaje para extracción del agua, necesaria en la operación de calibración y ajuste de nivelación durante la etapa de puesta a punto de medición de volumen de biogás generado.

Ambos recipientes contienen agua acidulada con 5% de ácido clorhídrico, para evitar que el  $\text{CO}_2$  (componente del biogás) se disuelva en el agua del medidor tergiversando la medición de volumen. (Yank L, et al. 2002). Esto condicionó la selección del material de los tubos (PVC) que conforman el gasómetro.

### 3. Medición de $\text{CO}_2$ en el biogás.

Para medir la composición del biogás generado se utilizó el método volumétrico (Standard Methods for Water and Wastewater) mediante el uso del dispositivo ORSAT.

### 4. Almacenamiento del biogás

Como recipiente de almacenamiento de biogás, se utilizaron garrafas de 13,5 litros de capacidad aproximada, especialmente acondicionadas para tal fin con un manómetro de alcance  $4 \text{ kg/cm}^2$  y electroválvula de retención normalmente cerrada, como se muestra en la figura 5. La presión necesaria para ingresar el biogás al interior de las garrafas se logra mediante un minicompresor de pistón alimentado por una batería de 12 V. Los elementos se muestran en la figura 3.



Figura 3: Elementos utilizados para el almacenamiento del biogás ya medido.

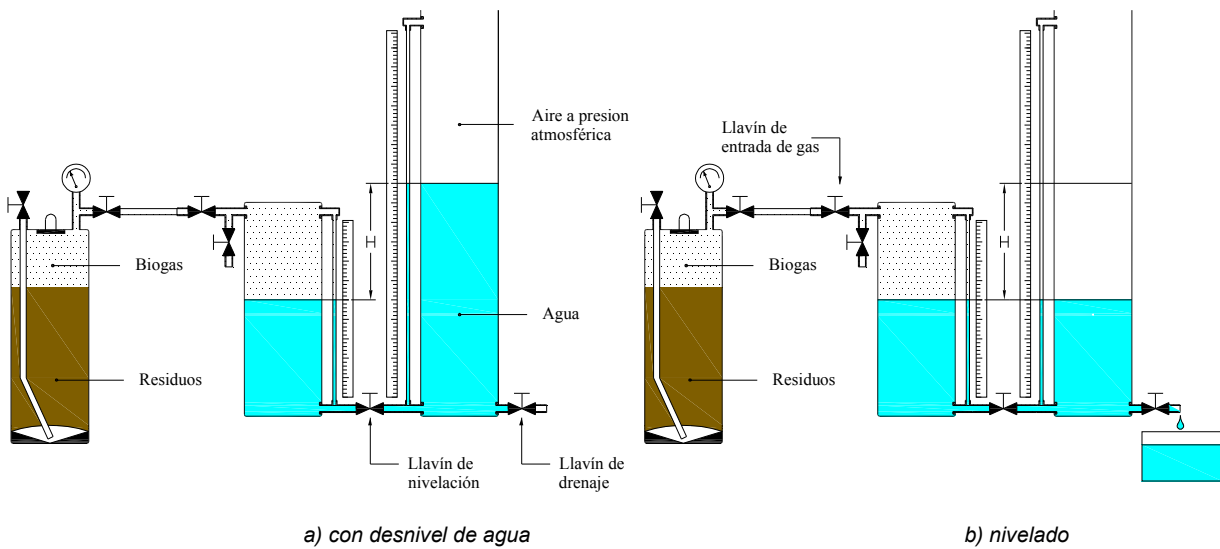


Figura 4: Esquema de funcionamiento del medidor.

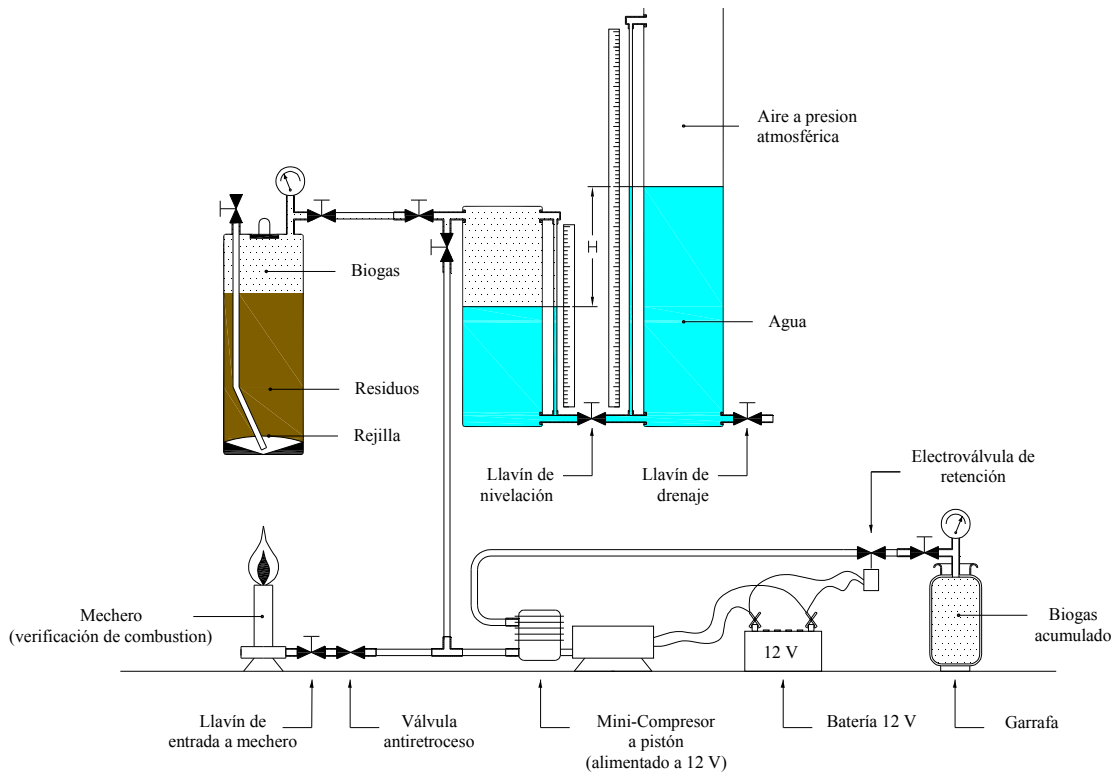


Figura 5: Esquema de funcionamiento del dispositivo completo incluyendo almacenamiento y/o uso.

## CALIBRACIÓN

El digester fue cargado con una mezcla de residuos sólidos domiciliarios (70%), estiércol de vaca (30%) y agua hasta cubrir las tres cuartas partes de su volumen. Luego el digester fue cerrado, se verificó su estanqueidad mediante una prueba hidráulica, se extrajo la primera muestra de sustrato y se lo mantuvo a una temperatura constante de  $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  para la calibración.

Inicialmente ambos tubos en U del gasómetro, están comunicados ("llavin de nivelación" se encuentra abierto), por lo que ambos tubos tienen el mismo nivel de agua acidulada, alcanzando el 90% de la capacidad del tubo de 0,50 m de altura. Esta condición, se verifica mediante lectura directa en las reglas de medición.

El biogás generado en el biodigester, ingresa por el "llavin de entrada de gas", estando el "llavin de salida de gas" cerrado, de forma que el volumen generado ejerce presión y desplaza el agua contenida en el recipiente cerrado hacia el recipiente abierto, produciéndose una diferencia de altura "H", proporcional a la diferencia entre la presión interior del

recipiente que recibe el gas y la presión atmosférica que se ejerce sobre la superficie de agua del tubo abierto. La figura 4 a) ilustra esta situación.

La diferencia de altura (H), también es representativa del volumen de gas ingresado. Note que un volumen de biogás ingresado en el recipiente cerrado desaloja un volumen de agua, haciendo que su nivel disminuya una cierta altura. Ese volumen de agua desalojada ingresa en el recipiente abierto, incrementando su altura en la misma medida. Como conclusión el desnivel H es el doble de la altura de biogás ingresado.

Considerando que el diámetro interno de los caños de PVC utilizados es de 19,2 cm, el volumen de biogás ingresado puede calcularse con la siguiente ecuación, en donde multiplicamos la superficie del recipiente por la altura del biogás desalojo (H/2):

$$V = \pi \cdot \frac{(19,2 \text{ cm})^2}{4} \cdot \frac{H}{2} = 144,76 \cdot H \quad (1)$$

Es de hacer notar que el gas almacenado en el recipiente pequeño del medidor no se encuentra a la presión atmosférica sino a una presión mayor (la de la columna de agua). Por lo tanto, la aplicación de la ecuación 1 llevaría a la introducción de un error.

Para medir el volumen de gas generado a presión atmosférica cerramos el “llavín de entrada de gas” y el “llavín de nivelación”, abrimos el “llavín de drenaje” y desalojamos el agua del recipiente más grande, de forma que baje su nivel de agua acidulada hasta igualar los niveles de ambos tubos en “U” (ver Figura 4 b). Una vez logrado tal nivelación, abrimos el “llavín de nivelación” comunicando ambos tubos nuevamente. Esto produce un nuevo desnivel por expansión del gas almacenado en el tubo cerrado, y repetimos el ciclo de nivelación: cierre del “llavín de nivelación”, apertura del “llavín de drenaje” y desalojo del agua acidulada del recipiente más grande hasta igualar los niveles de ambos tubos, y así sucesivamente hasta que en una de las aperturas del “llavín de nivelación”, no se observe producción de desnivel por esta acción, situación en que se asume que ambos recipientes están a presión atmosférica.

El volumen total de agua desalojada, representa el doble del volumen de gas generado a presión atmosférica. Al considerar su mitad obtenemos el volumen objeto de este estudio.

Sucesivas mediciones de volúmenes de biogás con el método descrito anteriormente nos permitió construir las graficas de la Figura 6, la parte a) de la izquierda, relaciona el desnivel H con el volumen de agua desalojado y el biogás producido por el biodigestor de prueba, la parte b) de la derecha, relaciona el desnivel H con el error que se cometería si se midiera el volumen de biogás habiendo un desnivel (utilizando la ecuación 1) y por ende, a una presión distinta de la atmosférica.

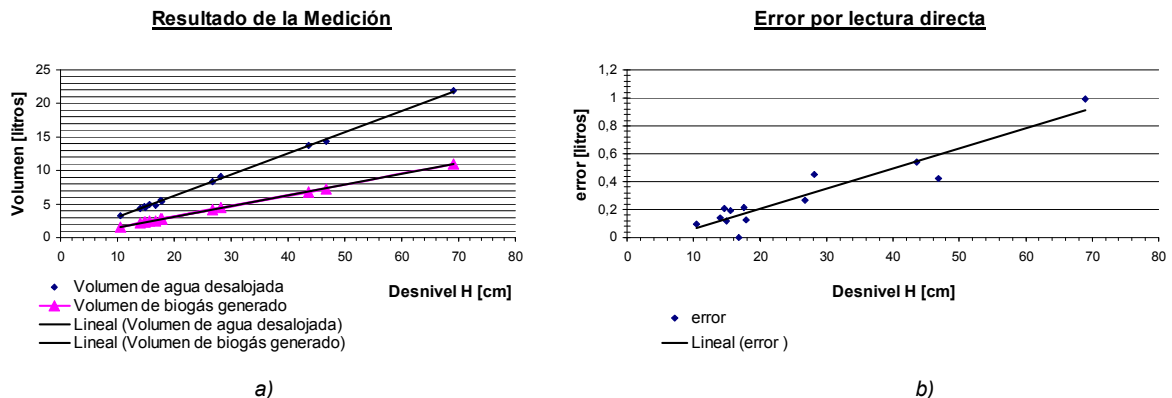


Figura 6: Curvas de calibración. a) relación del desnivel H con el volumen de agua desalojado y con el biogás generado, b) relación del desnivel H con el error que se comete si se calcula el volumen de biogás utilizando la ecuación (1).

Como muestra la Figura 6, los resultados son lineales como era de esperar. En la figura 6 b) se observa que el error que se cometería al medir el volumen de biogás con la ecuación 1, en lugar de hacerlo a presión atmosférica, puede alcanzar casi 1 litro en algo más de 10 litros, lo que equivale a un 10% de error aproximadamente.

La utilidad práctica de esta calibración, es que a partir de estos resultados se puede correlacionar el desnivel H con el verdadero volumen de biogás generado, sin tener que desalojar el agua acidulada del medidor en “U” (gasómetro), sino mediante una ecuación lineal obtenida por el método de los cuadrados mínimos, eliminando de esta forma una fuente de error (presión distinta a la atmosférica).

Los coeficientes A y B, pendiente y ordenada al origen respectivamente, de una ecuación lineal, pueden calcularse por el método de los cuadrados mínimos a partir de un conjunto de pares  $(x_i, y_i)$ . En las siguientes ecuaciones (2) y (3), n representa la cantidad de puntos  $(x_i, y_i)$  que se tiene para construir la ecuación lineal:

$$A = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^k x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^k x_i \cdot \sum_{i=1}^k y_i}{N \cdot \sum_{i=1}^k x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^k x_i \right)^2} \quad (2)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^k x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^k y_i - \sum_{i=1}^k x_i \cdot \sum_{i=1}^k x_i \cdot y_i}{N \cdot \sum_{i=1}^k x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^k x_i \right)^2} \quad (3)$$

El resultado de este estudio, muestra que la ecuación de la recta que mejor se adapta a los datos mostrados en la figura 6 a) es:

$$y = A \cdot x + B = 0,15 \cdot x - 0,08 \quad (4)$$

Donde:

y = volumen de biogás generado a presión atmosférica y 21 °C [litros]  
 x = desnivel H entre los recipientes del medidor [cm]

La capacidad del gasómetro en “U”, permite su utilización hasta los 15 litros de biogás sin problemas, y considerando como valor verdadero de volumen de biogás generado el volumen de agua desalojada hasta equiparar los niveles, podemos determinar que:

	Utilizando la ecuación (1)	Desalojando agua	Utilizando la ecuación (4)
Alcance	15 litros	15 litros	15 litros
Forma de medición	V [litros] = 0,145 * H [cm]	Pesaje	V [litros] = 0,159 * H [cm] - 0,082
Error máximo detectado	1 litro	0 litros	0,167 litros
Error máximo referido al alcance	6,65 %	0 %	1,12 %

Tabla 1: Resumen de los resultados de la calibración.

La figura 7 muestra la variación del error relativo en la medición del volumen de biogás generado utilizando la ecuación (4) que como ya vimos, es la que produce menor error, y resultará de utilidad para la automatización como veremos en el siguiente punto.

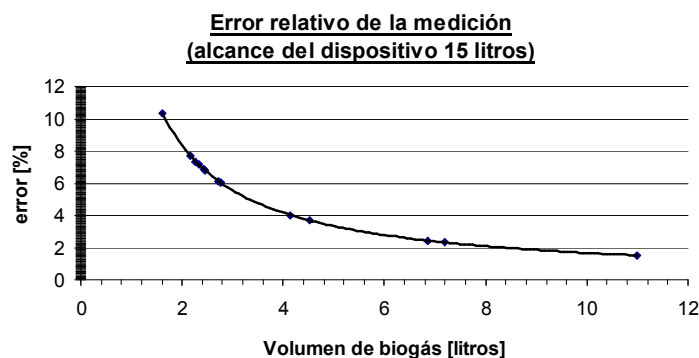


Figura 7: Curva de variación del error relativo en la medición de biogás por el método de los mínimos cuadrados.

## CONCLUSIONES

El sistema de medición asociado a un biodigestor como el utilizado, resulta relativamente económico, y los ensayos verificaron su correcto funcionamiento para los fines buscados, permitiendo la operación del biodigestor, a una presión cuasi-constante cercana a la atmosférica.

Permite medir el volumen de biogás generado a presión atmosférica, con un nivel de error razonable (menor al 2%), con lo que se podrán realizar ensayos en escala laboratorio, buscando las condiciones para alcanzar el máximo rendimiento de generación de biogás, utilizando como sustrato diversos materiales orgánico biodegradables presentes en la región.

Así mismo, está previsto su uso en investigación, como herramienta que permite la concreción de los objetivos comprometidos en el proyecto “Estudio de Alternativas Tecnológicas para la Generación y Conversión Energética Biogás-Eléctrica”, que el grupo de trabajo lleva adelante.

También está previsto su uso en docencia, como dispositivo para que los alumnos realicen actividades de Formación Práctica en el “Laboratorio de Automatismos Industriales”, con financiamiento en el marco del Programa de Mejoramiento de la Enseñanza de la Ingeniería (PROMEI-SPU-MECyT), previéndose su futura automatización. En este sentido, resulta relevante la determinación de la ecuación que permite calcular el volumen de biogás generado, sin necesidad de drenar agua acidulada del medidor de volumen, como así también su cota de error, resultando de vital importancia para el diseño del algoritmo de control del sistema. La utilización académica del sistema en su conjunto, permitirá la enseñanza de “programación de autómatas”, y oficiará como disparador de toma de conciencia de los alumnos sobre la problemática ambiental.

El diseño del sistema de medición expuesto, y su automatización, mediante la co-financiación por parte del proyecto de investigación 15/G174 de la Universidad Nacional de Mar del Plata, y el sub-Proyecto del Programa de Mejoramiento de la Enseñanza en Ingeniería, compatibiliza los intereses de investigación y los intereses académicos, en un marco de uso racional de los recursos de la institución.

## AGRADECIMIENTOS

- METALURGICA KEEP.
- INDUSTRIAS BRIEVA.

## REFERENCIAS

APHA, AWWA, WEF. (1994) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20<sup>th</sup> Edition.

Tchobanoglous, G; Theisen, H; Vigil, S. (1998). Gestión Integral de Residuos Sólidos. McGraw-Hill. ISBN 04-481-124.

Plaza Gloria, Máximo Menna, Susana Jacob. (1999). “Gestión de la Fracción Orgánica Municipal de la ciudad de Mar del Plata”. Revista Científica Avances en Energías Renovables. Vol 2, N° 2, , páginas 07.5 - 07.8. ISSN 0329-5184.

Menna Máximo, Gloria Plaza, Julio Branda, Guillermo Murcia. (2004). Tecnología Regional Simple para el Tratamiento Aerobio de la Fracción Orgánica Municipal. En Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 8, N° 1, páginas 1.99 a 1.104. ISSN 0329-5184.

Menna Máximo, Susana Jacob, Gloria Plaza, Horacio DiVelz, Juan Carlos Cid, Osvaldo Pacheco. (2001). “Household Solid Waste Sampling for Mar del Plata city –Argentina”. En la Revista ISWA TIME de la International Solid Waste Association. SIN 0906-1435, Issue N° 3, páginas 8 a 11.

Yank L, Martina P, Corace, J. (2002). Determinación de CO<sub>2</sub> en diferentes muestras de gas mediante el uso del aparato de Orsay, Grupo de Investigación de Energías Renovables (GIDER), Dpto. de Termodinámica - Facultad de Ingeniería – UNNE, Resistencia - Chaco - Argentina.

## ABSTRACT

This paper is part of an integrated project which looks after an answer to the problem of the current urban solid waste management of Mar del Plata city. It involves the construction and testing stages, for a further automatization of a gas meter for a low power pilot plant for biogas generation, which will allow the evaluation of the potential energy recovery of methane from the organic fraction of different solid wastes produced in the city.

This prototype, built in the framework of the Programme for Improvement on Engineering Teaching, also has didactical and demonstrative applications.

Here there are introduced some topics involving the construction characteristics and use of the gas meter facilities, measurements of the biogas produced from organic solid wastes, further storage and conversion to electric power.

**Keywords:** biogas quantification, biological treatment, solid wastes valorisation, environmental education.