

ISSN 2410-3950

Volumen 3, Número 8 – Julio –Septiembre 2016

# Revista de Sistemas Experimentales

**ECORFAN<sup>®</sup>**

## Indización



**ECORFAN-Bolivia**

Google Scholar

Research Gate

REBID

Mendeley

RENIECYT

## **ECORFAN-Bolivia**

### **Directorio**

#### **Principal**

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

#### **Director Regional**

IGLESIAS-SUAREZ, Fernando. BsC

#### **Director de la Revista**

SERRUDO-GONZALES, Javier. BsC

#### **Edición de Logística**

PERALTA-CASTRO, Enrique. PhD

#### **Diseñador de Edición**

TREJO-RAMOS, Ivan. BsC.

Revista de Sistemas Experimentales, Volumen 3, Número 8, de Julio a Septiembre-2016, es una revista editada trimestralmente por ECORFAN-Bolivia. Loa 1179, Cd. Sucre. Chuquisaca, Bolivia. WEB:

[www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org), [revista@ecorfan.org](mailto:revista@ecorfan.org).  
Editora en Jefe: RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD, Co-Editor: IGLESIAS-SUAREZ, Fernando. ISSN-2410-4000. Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática ECORFAN. ESCAMILLA-BOUCHÁN, Imelda. PhD, LUNA-SOTO, Vladimir. PhD, actualizado al 30 de Septiembre del 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no reflejan necesariamente las opiniones del editor de la publicación.

Queda terminantemente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin permiso del Instituto Nacional del Derecho de Autor.

## **Consejo Editorial**

ALEMÓN-MEDINA, Francisco Radamés. PhD  
*Instituto Nacional de Pediatría-México*

POSADA-GOMEZ, Ruben. PhD  
*Institut National Polytechnique de la Lorraine-Francia*

RUIZ-AGUILAR, Graciela. PhD  
*Universidad de Guanajuato-México*

RANGEL-VILLALOBOS, Hector. PhD  
*Universidad De Guadalajara-México*

SOTERO-SOLIS, Victor Erasmo. PhD  
*Universidad Nacional de la Amazonia Peruana-Perú*

CORTES-SANCHEZ, Alejandro de Jesus. PhD  
*Secretaria de Salud-México*

HERNANDEZ-MARTÍNEZ, Rufina. PhD  
*University of California-USA*

PALOS-PIZARRO, Isidro. PhD  
*Universidad Autonoma de Tamaulipas-México*

## **Consejo Arbitral**

PNPI. PhD

*Instituto Nacional de Neurologia y Neurocirugia-México*

DAJWZ. PhD

*Federal University of MatoGrosso-Brasil*

PRL. PhD

*Universidad Tecnologica de Culiacan-México*

GTCC. PhD

*Universidad Central de Venezuela-Venezuela*

DFSNM. PhD

*Universidad Autonoma de Coahuila-México*

RLR. PhD

*Universidad Autonoma de Sonora-México*

ACG. PhD

*Instituto Politécnico Nacional-México*

PFC. PhD

*Washington State University-USA*

## Presentación

ECORFAN, es una revista de investigación que publica artículos en las áreas de: Sistemas Experimentales.

En Pro de la Investigación, Enseñando, y Entrenando los recursos humanos comprometidos con la Ciencia. El contenido de los artículos y opiniones que aparecen en cada número son de los autores y no necesariamente la opinión del Editor en Jefe.

En el primer número es presentado el *Diseño y operación de un reactor anaerobio de flujo ascendente empacado con lecho de lodos (RAFAELL) para la producción de metano* por VIGUERAS-CARMONA, Sergio, VIAN-PÉREZ, José, VELÁSICO-PÉREZ, Alejandra y ZAFRA-JIMÉNEZ, Gabriela, con adscripción en el Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec y la Universidad Veracruzana, como siguiente artículo está *Comparación de métodos experimentales para obtener los parámetros eléctricos de un motor de inducción* por REVUELTA-GARCÍA, José, GONZÁLEZ-PARADA, Adrián y BOSH-TOUS, Ricard, en el siguiente artículo está *Navegación multi-objetivos para robots móviles en entornos con obstáculos* por VÁZQUEZ-SANTACRUZ, J, PORTILLO-VELEZ, R, MARÍN-URIAS, L y PORRAGAS-BELTRÁN, L con adscripción en la Universidad Veracruzana, como siguiente artículo está *Proceso sustentable de obtención de biodiesel* por BAUTISTA-VARGAS, María, GARCÍA-NAVARRO, Josefina, CABRERA-CRUZ, René y TORRES-MORENO, Ruth con adscripción en la Universidad Autónoma de Tamaulipas, como siguiente artículo está *Potencial de generación de biogás de un rancho ganadero en la comunidad de San Bartolo Cuautlalpan* por ESPINAL-ARELLANO, Juan, OLVERA-GARCÍA, Omar, HERNÁNDEZ-GÓMEZ, Víctor y MORILLÓN-GÁLVEZ, David con adscripción en la Universidad Nacional Autónoma de México.

## Contenido

| Artículo  | Página |
|---|--------|
| <b>Diseño y operación de un reactor anaerobio de flujo ascendente empacado con lecho de lodos (RAFAELL) para la producción de metano</b><br>VIGUERAS-CARMONA, Sergio, VIAN-PÉREZ, José, VELÁSICO-PÉREZ, Alejandra y ZAFRA-JIMÉNEZ, Gabriela | 1-7    |
| <b>Comparación de métodos experimentales para obtener los parámetros eléctricos de un motor de inducción</b><br>REVUELTA-GARCÍA, José, GONZÁLEZ-PARADA, Adrián y BOSH-TOUS, Ricard  | 8-17   |
| <b>Navegación multi-objetivos para robots móviles en entornos con obstáculos</b><br>VÁZQUEZ-SANTACRUZ, J, PORTILLO-VELEZ, R, MARÍN-URIAS, L y PORRAGAS-BELTRÁN, L   | 18-26  |
| <b>Proceso sustentable de obtención de biodiesel</b><br>BAUTISTA-VARGAS, María, GARCÍA-NAVARRO, Josefina, CABRERA-CRUZ, René y TORRES-MORENO, Ruth  | 27-35  |
| <b>Potencial de generación de biogás de un rancho ganadero en la comunidad de San Bartolo Cuautlalpan</b><br>ESPINAL-ARELLANO, Juan, OLVERA-GARCÍA, Omar, HERNÁNDEZ-GÓMEZ, Víctor y MORILLÓN-GÁLVEZ, David                                  | 36-52  |
| <i>Instrucciones para Autores</i>   |        |
| <i>Formato de Originalidad</i>  |        |
| <i>Formato de Autorización</i>  |        |

## Diseño y operación de un reactor anaerobio de flujo ascendente empacado con lecho de lodos (RAFAELL) para la producción de metano

VIGUERAS-CARMONA, Sergio\*†, VIAN-PÉREZ, José', VELÁSICO-PÉREZ, Alejandra' y ZAFRA-JIMÉNEZ, Gabriela.

*Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, División de Ingeniería Química y Bioquímica  
'Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas,*

Recibido Julio 22, 2016; Aceptado Septiembre 15, 2016

### Resumen

El objetivo de este trabajo fue diseñar un reactor anaerobio para el tratamiento de residuos sólidos urbanos orgánicos vegetales (RSUOV), sus características están vinculadas con los procesos bioquímicos de la digestión anaerobia. El diseño del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente Empacado con Lecho de Lodos (RAFAELL) está basado en el mejoramiento de la eficiencia de producción de metano y remoción de sólidos. El diseño considera una etapa de pretratamiento en la que los RSUOV son sometidos a esfuerzos cortantes para incrementar el número de partículas menores a 150  $\mu\text{m}$  y la concentración de sólidos disueltos (partículas menores a 2.5  $\mu\text{m}$ ). Además, se ha incluido un lecho de lodos para incrementar el tiempo de residencia celular en el reactor. La sección de empaque permite mantener separadas las fases hidrolítica y metanogénica lo que mejora el control del proceso. Los flujos hidráulicos permiten transportar la fracción más rápidamente biodegradable al lecho de lodo, lo que favorece su transformación a metano. Estas características, incluidas en un solo reactor, permiten mejorar la eficiencia del proceso anaerobio. Al evaluar el comportamiento del RAFAELL se obtuvieron buenas eficiencias de remoción de sólidos (67%) en 12 días con productividades de metano de 1.45  $\text{L}_{\text{CH}_4}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ , valores proporcionales a las cargas orgánicas aplicadas al sistema (0.66 – 2.5  $\text{gSV}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ).

### Diseño, reactor, metano

**Citación:** VIGUERAS-CARMONA, Sergio, VIAN-PÉREZ, José', VELÁSICO-PÉREZ, Alejandra' y ZAFRA-JIMÉNEZ, Gabriela. Diseño y operación de un reactor anaerobio de flujo ascendente empacado con lecho de lodos (RAFAELL) para la producción de metano. Revista de Sistemas Experimentales. 2016, 3-8: 1-7

### Abstract

The aim of this work was to design an anaerobic reactor for treating the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW); their characteristics are linked to the biochemical processes of anaerobic digestion. Design Up flow anaerobic sludge blanket solid-state reactor (RAFAELL, for acronyms in Spanish, Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente Empacado con Lecho de Lodos) is based on improving the efficiency of methane production and removal of solids. The design considers a pre-treatment stage in which OFMSW are subjected to shear to increase the number of particles smaller than 150  $\mu\text{m}$  and the concentration of dissolved solids (particles smaller than 2.5  $\mu\text{m}$ ). Furthermore, it has included a sludge bed to increase the time of cell residence in the reactor. Solid-state section allows separating hydrolytic and methanogenic phases which improves process control. Hydraulic flows transports the faster biodegradable fraction to sludge bed, which favors its conversion to methane. These features included in a single reactor, allow improving the efficiency of the anaerobic process. In assessing the behavior of RAFAELL were obtained good solid removal efficiencies (67%) in 12 days, with methane productivity of 1.45  $\text{L}_{\text{CH}_4}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$  which is proportional to the organic loads applied to the system (0.66 – 2.5  $\text{gSV}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ).

### Design, reactor, methane

\* Correspondencia al Autor (Correo electrónico: svigueras@tese.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer Autor.

## Introducción

Tradicionalmente, los residuos sólidos urbanos se disponen en rellenos sanitarios, que al carecer de un adecuado control, son responsables de la mayor descarga de gases de efecto invernadero a la atmósfera, por lo que tecnologías de menor impacto medioambiental adquieren relevancia (Themelis, 2008) entre las que destaca la digestión anaerobia debido a que produce energía. Los procesos anaerobios han sido empleados para el tratamiento de aguas residuales debido a sus características de recuperación de energía, baja producción de lodos residuales y de su capacidad para tratar elevadas cargas orgánicas. Por lo anterior, la tecnología de digestión anaerobia se ha extendido a la estabilización de residuos sólidos, como los provenientes de actividades agrícolas, residuos de comida y lodos de desecho (Ward et al., 2008).

En el proceso de estabilización de los residuos sólidos, diversas tecnologías anaerobias como los procesos Dranco, Valorgas y Kompogás se han consolidado a escala industrial (Fagbohunge et al., 2015). Además una variedad de diseños de reactores se han propuesto recientemente los cuales han incrementado significativamente las velocidades de reacción del proceso de digestión de los residuos (Mao et al., 2015). De acuerdo con Ward y colaboradores (2008), un bioreactor anaerobio debe ser diseñado con la finalidad de maximizar la producción de metano, aplicando continuamente elevada carga orgánica y operando a cortos tiempos de retención hidráulica.

Actualmente, los bioreactores utilizados para la metanización de distintos tipos de residuos se pueden clasificar como reactores por lotes y sistemas continuos de una etapa y multi-etapa.

Entre las configuraciones de bioreactores anaerobios mayormente utilizados se encuentran el bioreactor de tanque agitado con alimentación continua, bioreactores tubulares, reactores batch en secuencia, reactores anaerobios de flujo ascendente RAFA y filtros anaerobios. Los reactores de dos o más etapas con alimentación continua, en los cuales las etapas bioquímicas de la digestión anaerobia, hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis se llevan a cabo de forma separada han mostrado mejor desempeño en términos de eficiencia de remoción y producción de biogás.

Sin embargo, el diseño de los reactores mencionados en anteriores párrafos se limita a aspectos hidráulicos y energéticos, por lo que algunos autores como Fernández-Polanco (2002) afirman que existe carencia de información para el diseño de este tipo de tecnología. Los RSUOV son complejos en estructura física y composición química, y se ha demostrado que la proporción de las fracciones con distinta biodegradabilidad determina la velocidad de hidrólisis en el proceso anaerobio (Vavilin, 2008; Cho, 1995). Entonces, considerando que la hidrólisis de los residuos es la etapa limitante del proceso (Lu, 2007), las características de los residuos a digerir afectan la velocidad de producción de metano como resultado de inhibición por acumulación de ácidos grasos volátiles AGV o por limitación de sustrato soluble (Polanco, 2015; Zhang, 2013; Visvanathan, 2012). Por lo anterior, es necesario realizar una caracterización apropiada de los residuos, con especial atención a las posibles limitaciones debido al tamaño de los sólidos y control de la etapa de hidrólisis.

## Materiales y métodos

### Caracterización de los residuos

Se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica de los residuos empleados para este estudio. Debido a la larga duración del estudio, fue necesario tomar muestras de RSUOV en diferentes momentos por lo que la proporción y tipos de residuos no fue la misma durante toda la etapa experimental. El pH y conductividad fueron determinados de acuerdo a Fernandez *et al.* (2006); densidad de empaque, porcentaje de humedad, sólidos totales y sólidos volátiles se determinaron mediante el método gravimétrico. Para la determinación de la demanda química de oxígeno, proteínas y carbohidratos, los residuos fueron secados en una estufa a 105 °C, posteriormente se homogenizó el tamaño de partícula triturando la muestra y tamizándola, finalmente se resuspendió la muestra en agua para tener una concentración de 1 g/L y se procedió conforme a Eaton *et al.*, (1998), Lowry *et al.*, (1951) y Goel *et al.*, (1998), respectivamente.

### Inóculo

Un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA) fue inoculado con una mezcla de lodo activado estabilizado anaeróbicamente y estiércol de vaca en proporción volumétrica 1:1. El reactor fue alimentado con lixiviado de RSUOV. La carga orgánica alimentada fue incrementando gradualmente conforme la eficiencia del reactor incrementó. Después de 100 días de operación, el inóculo alcanzó una actividad metanogénica de 0.21 kg DQO<sub>CH4</sub>.kg<sup>-1</sup>SSV.d<sup>-1</sup>. La composición del biogás fue determinada mediante cromatografía de gases, usando un cromatógrafo (GOW-MAC con integrador SP-4290) equipado con un detector de conductividad térmica (TCD) y una columna empacada con Carbosphere.

### Dinámica de solubilización de los residuos sólidos urbanos orgánicos vegetales

Los RSUOV previamente cortados con un tamaño de partícula de 1 cm se empacaron dentro de un reactor de 8 L. Una vez empacados los residuos se llevó a cabo recirculación de agua residual municipal a través del lecho, fijando una velocidad ascensional de 1 m.h<sup>-1</sup>. Diariamente se tomó una muestra de 100 mL misma que se reemplazó en el reactor con agua residual municipal cruda. A la muestra tomada se le determinó la concentración de sólidos totales ST y sólidos volátiles SV. Una vez que el efluente se saturó de sólidos fue reemplazado por agua residual cruda, al periodo de tiempo entre cada recambio de agua cruda se le denominó ciclo de recirculación.

### Distribución del tamaño de partícula

La columna empacada sometida a recirculación de agua a distintas velocidades ascensionales fue operada con un tiempo de retención hidráulico de 10 días. Al efluente purgado se le determinó la distribución del tamaño de partícula. Lo anterior se realizó pasando muestras de 50 mL a través de tamices de tamaño de poro de 105, 74, 62, 54 y 37 μm, y filtrando otras a través de papeles de tamaño de poro de 25, 16, 11, 8, 6, 3 y 2.5 μm.

Al final de lo anterior se tenían 13 muestras de líquido con sólidos de tamaño >105, >74, >62, >54, >37, >25, >16, >11, >8, >6, >3 y >2.5 μm respectivamente, a las que se les determinó la concentración de sólidos totales. Posteriormente, se comparó la cantidad de sólidos en cada muestra con el contenido de sólidos en una muestra del efluente sin tamizar (sólidos totales en la muestra) para obtener el porcentaje de sólidos para cada tamaño de partícula.

## Biodegradabilidad anaerobia de los residuos sólidos

Conforme al protocolo de Field (1986), se determinó la biodegradabilidad anaerobia, tanto de sólidos solubles ( $< 2.5 \mu\text{m}$ ) como de sólidos suspendidos ( $> 2.5 \mu\text{m}$ ) para una mezcla de RSUOV sometida a recirculación de agua.

Los ensayos se llevaron a cabo en botellas serológicas de 120 mL con un volumen de reacción de 80 mL. La concentración del inóculo fue de  $2.5 \text{ g SSV.L}^{-1}$ , mismo que tenía una actividad metanogénica específica de  $0.21 \pm 0.03 \text{ g DQO}_{\text{CH}_4} \cdot \text{g}^{-1} \text{ SSV} \cdot \text{d}^{-1}$ . El sustrato para este ensayo fueron los sólidos contenidos en el efluente de la columna empacada y sometida a recirculación de agua, la concentración del efluente fue diluida para obtener una relación sustrato-inóculo en el ensayo de  $1.2 \text{ g DQO}_{\text{acetato}}/\text{g SSV inóculo}$ . La cuantificación de metano se realizó mediante cromatografía de gases.

Al RSOUV retirado al finalizar los ciclos de recirculación se le quitó el exceso de agua y se trituró en un extractor de frutas, el líquido fue recuperado y pasado por un tamiz con tamaño de partícula de  $105 \mu\text{m}$ . El bagazo fue exprimido usando un cedazo hasta extraer el máximo de líquido, que fue también tamizado. La mezcla de las dos fracciones líquidas fueron utilizadas para determinar la biodegradabilidad del empaque.

### Diseño del reactor anaerobio

Los criterios de diseño del reactor anaerobio fueron: la velocidad ascensional, el tiempo de retención hidráulico y el porcentaje de biodegradabilidad de los sólidos.

En esta etapa se estableció la velocidad ascensional adecuada para promover la reducción del tamaño de partícula y mantener el lecho de lodos en la sección de metanogénesis. Por otro lado, se estableció el tiempo de retención hidráulica óptimo para lograr la mayor eficiencia de remoción de carga orgánica. A partir de los resultados obtenidos se diseñó el reactor.

Para establecer la velocidad ascensional, una columna de 8 L fue empacada con mezcla de RSUOV con tamaño de partícula de 1 cm y se sometió a recirculación de agua, fijando velocidades ascensionales de 0.5, 1, 1.4 y  $2 \text{ m.h}^{-1}$ . El agua utilizada fue agua residual municipal. Diariamente se tomó muestra de 100 mL a la que se determinó la concentración de sólidos totales y sólidos volátiles.

Para establecer el tiempo de retención hidráulico se tomó como base la información generada en las pruebas de biodegradabilidad de los residuos. El TRH correspondió al tiempo necesario para alcanzar una velocidad constante de producción de metano.

## Resultados

### Caracterización de los residuos

Las características de la mezcla de empaque se exponen en la Tabla 1, los valores obtenidos están dentro del intervalo reportado en estudios previos para mezclas similares de RSUOV.

El valor determinado para la concentración de DQO es 100 veces más grande en comparación al reportado por Liu *et al* (2008), debido a que este último sólo emplea la fracción líquida después de la hidrólisis ácida de los residuos, quedando la mayor cantidad de DQO en el residuo no hidrolizado.

### Dinámica de solubilización de los residuos

Los pretratamientos utilizados en el proceso de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos, tienen como principal objetivo acelerar la solubilización e hidrólisis del residuo, en este estudio el pretratamiento fueron los esfuerzos cortantes del agua sobre los residuos. Para evaluar el efecto de los esfuerzos cortantes, debido al flujo, sobre la dinámica de solubilización de los RSOUV se determinó la distribución del tamaño de partícula. En la Gráfica 1, se observa que al aumentar la velocidad ascensional, el porcentaje de partículas menores a 20  $\mu\text{m}$  aumenta, lo que implica que los esfuerzos cortantes a los que son sometidos los residuos aceleran la modificación de la estructura del residuo vegetal provocando la liberación del agua y la reducción del tamaño de partícula.

A una velocidad ascensional de 1.64  $\text{m.h}^{-1}$  se observa que el 93% de las partículas tienen tamaños menores a 20  $\mu\text{m}$ . Por otro lado, los reactores anaerobios de flujo ascendente diseñados con base en la carga hidráulica, establecen una velocidad ascensional menor o igual a 1  $\text{m.h}^{-1}$  para reactores que utilizan lodos anaerobios floculantes. Utilizando estos dos criterios se realizó la dinámica de solubilización de una columna empacada con residuos urbanos orgánicos vegetales, estableciendo la velocidad ascensional en 1  $\text{m.h}^{-1}$  y el tiempo de retención hidráulico en 10 d.

En la Gráfica 2 se observa la dinámica de solubilización de los sólidos en el agua residual (concentración inicial de sólidos de 0.05  $\text{g SV.L}^{-1}$ ). A los primeros 6 días llega a su máxima concentración (6.75  $\text{g SV.L}^{-1}$ ). El segundo ciclo, el efluente llega a su máximo el día 17 (3.12  $\text{g SV.L}^{-1}$ ). El tercer ciclo inicia el día 19, llegando a su máximo el día 23 (3.45  $\text{g SV.L}^{-1}$ ).

El último ciclo inicia en el día 24 y llega a una máxima concentración el día 32 (2.13  $\text{g SV.L}^{-1}$ ). Se observa también que el agua residual se satura rápidamente con sólidos en cada uno de los ciclos.

Durante este experimento también se observó un cambio en la densidad de empaque del RSOUV, pasando de 0.9  $\text{kg.L}^{-1}$  a 0.5  $\text{kg.L}^{-1}$ . El volumen de los residuos al final fue el 40 % del volumen inicial y el tamaño de partícula promedio del empaque fue menor a 5 mm, esta disminución se logró en un periodo de 35 días, lo que representa alrededor de 3.5 menos tiempo que el utilizado en el composteo tradicional para reducir en esa magnitud el volumen de los residuos tratados.

### Biodegradabilidad anaerobia de los residuos sólidos

Al efluente obtenido en cada una de los ciclos de recirculación le fue medida su biodegradabilidad anaerobia (Tabla 2). El efluente fue disminuyendo su biodegradabilidad conforme avanzan los ciclos de recirculación. La baja biodegradabilidad del RSOUV (por debajo de 50%) después de la recirculación debe estar asociada a su composición (polisacáridos como celulosas), en concordancia con diversos autores (Moshier, 2005; Hilkieh, 2008) que trabajaron con materiales ricos en celulosa 38.81 %, hemicelulosa 29.5 % y lignina 7.1 % que son materiales de baja biodegradabilidad (por debajo de 50 %).

### Asignación del valor de los parámetros de diseño

En la Gráfica 3 se muestran el valor de los sólidos totales en el efluente del reactor a las diferentes velocidades ascensionales.

Se observa que de 0.5 a 1.44 m.h<sup>-1</sup> la concentración de sólidos en el efluente está por debajo de 0.15 g SST.L<sup>-1</sup> y que para la velocidad de 2 m.h<sup>-1</sup> se incrementa la concentración de sólidos hasta 0.33 g SST.L<sup>-1</sup>, con una desviación estándar mayor, lo que implica que la salida de sólidos puede llegar hasta 0.45 g SST.L<sup>-1</sup>. Así que se estableció como velocidad ascensional de operación de 1.4 m.h<sup>-1</sup>, ya que a ésta se pueden tener mejor calidad del efluente que abandona el reactor. Para establecer el tiempo de retención hidráulica se utilizó la información generada en la pruebas de biodegradabilidad, en ellas se estableció que el tiempo promedio en el que se alcanza una velocidad de producción de metano constante fue de 7 ± 3 días. Por lo que se estableció un tiempo de retención hidráulica de 10 días.

### Construcción y puesta en marcha del reactor anaerobio de flujo ascendente empacado con lecho de lodos

El reactor fue construido de acrílico con tres compartimientos (Figura 1), cada uno con un volumen total de 8 L y un área de 400 cm<sup>2</sup>. La relación área/longitud máxima que se obtuvo para lograr una buena distribución de la alimentación a escala laboratorio fue de 20. La parte superior del reactor tiene una mampara de separación sólido-líquido-gas [(i), Figura 1]. El flujo hidráulico del reactor es controlado por dos bombas peristálticas, una controla la velocidad ascensional (I<sub>1</sub>) y la otra el tiempo de retención hidráulico (I<sub>2</sub>). El cárcamo de alimentación [(m), Figura 1] está en un baño de temperatura controlada para mantener la alimentación del efluente a 35 °C.

Para iniciar la operación del reactor se utilizaron 6 L del inóculo previamente adaptado (actividad metanogénica de 0.43 ± 0.06 g DQO<sub>CH4</sub>.g<sup>-1</sup>SSV.d<sup>-1</sup>) colocado en la primera sección del reactor [(b), Figura 1].

La sección superior del reactor (c) fue empacada con RSOUOV con un tamaño de partícula promedio de 1 cm. El RAFAELL se llenó con agua residual que es recirculada para que pase a través del lecho de lodo anaerobio, ascienda por una zona de mezclado (e) y llegue a la sección de empaque en donde los esfuerzos cortantes provocan la reducción del tamaño de partícula de los RSOUV, transportando las partículas más pequeñas al lecho de lodo.

El biogás es retirado continuamente utilizando un separador sólido-líquido-gas y cuantificado por un contador magnético de pulsos [(n), Figura 1]. La eficiencia del sistema se evaluó determinando la productividad de metano L<sub>CH4</sub>.L<sub>R</sub><sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>.

La Gráfica 4 muestra la productividad del RAFAELL con respecto a la carga orgánica. En el intervalo ensayado (0.66 a 2.5 g SV.L<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>) la productividad metanogénica aumentó proporcionalmente conforme aumentó la carga orgánica, llegando a un valor máximo 1.45 L<sub>CH4</sub>.L<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>, los valores reportados para sistemas similares al RAFAELL son de hasta 4 L<sub>CH4</sub>.L<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> (Montalvo, 2003) para cargas de hasta 5 g SV.L<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>.

El principal problema que presentó el RAFAELL durante su operación fue la acumulación de ácidos grasos volátiles (Gráfica 5) lo que provocó una disminución en el pH, Gráfica 6. El control del pH en el RAFAELL se realizó adicionando al cárcamo de bombeo el volumen necesario de una solución 5 N de hidróxido de sodio, sin embargo, después de 12 horas el pH volvió a descender, este comportamiento fue periódico en todas las cargas orgánicas ensayadas. Para aumentar el poder de amortiguamiento del RAFAELL se agregó bicarbonato de sodio hasta tener una relación 1 g HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.g<sup>-1</sup> DQO, dándole mayor estabilidad al RAFAELL.

En la Tabla 2 se muestra de forma resumida las condiciones de operación y parámetros de diseño del RAFAELL ensayadas en este estudio.

### Conclusiones

El reactor anaerobio de flujo ascendente empacado con lecho de lodos (RAFAELL), fue diseñado considerando los aspectos bioquímicos de la digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos. El diseño permite mejorar la eficiencia del proceso anaerobio,  $0.58 \text{ m}^3 \text{ biogas.kg}^{-1} \text{ SV}$ , además de facilitar el control y operación del digestor.

En general el RAFAELL presenta buena eficiencia de remoción de sólidos volátiles a las cargas ensayadas (67 %) y aunque la productividad aún está por debajo de los valores reportados para sistemas similares, las cargas orgánicas en el RAFAELL son 10 veces más pequeñas comparado con los sistemas comerciales ( $12 \text{ g SV.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$ ). Por lo que todavía se debe trabajar en el establecimiento de la máxima cantidad de RSUOV que puede soportar el RAFAELL y determinar su factibilidad operando como un reactor de lote alimentado.

El principal problema encontrado al operar el RAFAELL fue el descenso en el pH (hasta pH 5) durante los primeros días de digestión de cada lote de alimentación, lo cual está asociado principalmente a la rápida producción de AGV en el sistema (llegando hasta  $50 \text{ meq AGV.L}^{-1}$ ).

Se deben establecer la máxima cantidad de RSUOV que puede soportar el RAFAELL, operado a  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , en el arranque y determinar su factibilidad operando como un reactor de lote alimentado (semicontinuo).

### Referencias

Cho, J.K., Park, S.C., Chang, H.N. (1995). Biochemical methane potential and solid- state anaerobic-digestion of Korean food wastes. *Bioresource Technology*. 52; 245-253.

Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Greenberg A. E. (1998) (APHA) Standard Methods for the examination of water and wastewater, 19ava. Edition, Washington D. C. U.S.A.

Fagbohunge, M.O., Dodd, L.C., Herbert, M.J., Semple, K.T., (2015). High solid anaerobic digestion: Operational Challenges and possibilities. *Environmental Technology & Innovation*. 4: 268-284.

Fernández L.C. (2006). Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. Instituto Mexicano del Petroleo. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. 19-22.

Fernández, F., M. Fernández Polanco, P.A. García Encina. (2002). Criterios para la selección de tecnología de digestión anaerobia de residuos sólidos. Latin American Workshop and Symposium an anaerobic digestión. Mérida, Yucatán, México.

Field, J., Sierra, R., Lettinga, G. (1986) Ensayos Anaerobios, Process of on Wastewater Anaerobic Treatments. Valladolid Spain.

Goel, R., Mino, T., Satoh, H., Matsuo, T. (1998). Comparison of hydrolytic enzyme systems in pure culture and activated sludge under different electron acceptor condition. *Water Science and Technology*, 37 (4-5), 335-343.

## Comparación de métodos experimentales para obtener los parámetros eléctricos de un motor de inducción

REVUELTA-GARCÍA, José\*†, GONZÁLEZ-PARADA, Adrián y BOSH-TOUS, Ricard.

Recibido Julio 20, 2016; Aceptado Septiembre 16, 2016

### Resumen

La determinación y medición de los parámetros de un motor de inducción es una actividad importante en el diseño y modelado de estas máquinas eléctricas. Conociendo los parámetros del circuito equivalente de cualquier motor se pueden realizar simulaciones para predecir su comportamiento bajo diferentes regímenes como pueden ser régimen transitorio, régimen en estado estable o régimen bajo condiciones de una falla incipiente. Por lo que en este trabajo, se presenta una metodología alterna para la determinación de los parámetros eléctricos de un motor de inducción y se compara con el procedimiento propuesto por la IEEE Std 112-2004, obteniendo buena concordancia con respecto a las evaluaciones realizadas de acuerdo a la norma IEEE 112-2004 y la metodología propuesta.

**Motor de inducción, parámetros eléctricos, pérdidas eléctricas, circuito equivalente**

### Abstract

The identification and measurement of the parameters of an induction motor is an important activity on the design and modeling of these electric machines. Knowing the equivalent circuit parameters of any electrical motor can be performed simulations to predict their behavior under different regimes such as steady state regime or under conditions of incipient failure. So in this paper, an alternative low cost methodology for determining the electrical parameters of an induction motor is presented and compared with the procedure methodology in the IEEE Std 112-2004, obtaining good agreement with respect to assessments under IEEE 112-2004 standard and the proposed methodology.

**Induction motors, electrical parameters, electrical losses, equivalent circuit**

**Citación:** REVUELTA-GARCÍA, José, GONZÁLEZ-PARADA, Adrián y BOSH-TOUS, Ricard. Comparación de métodos experimentales para obtener los parámetros eléctricos de un motor de inducción. Revista de Sistemas Experimentales 2016, 3-8: 8-17

\* Correspondencia al Autor (Correo electrónico: jrevuelta29066@yahoo.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

La determinación de los parámetros eléctricos en los motores de inducción es un tema importante en el diseño y construcción de los motores eléctricos con la determinación de sus parámetros eléctricos, es posible determinar las pérdidas teóricas, verificar su comportamiento en el arranque y todos los parámetros de diseño, lo cual puede ser comprobado posteriormente durante las pruebas de laboratorio.

El presente trabajo tiene la finalidad de evaluar y comparar diferentes metodologías de prueba para la obtención de los parámetros eléctricos de un motor de inducción. En la obtención de cada uno de los parámetros se aplicaron dos métodos y se realiza una comparación de ambos resultados. Uno de los métodos para obtener estos parámetros es el propuesto por la norma IEEE 112-1996: Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators y el otro método se realiza a partir de mediones directas de cada uno de los componentes del motor considerando equipo convencional.<sup>[2]</sup>

## Desarrollo

En primer término se realizó la determinación de parámetros de acuerdo a la metodología propuesta en la norma IEEE-112 y después se realizó la determinación alternativa de los mismos parámetros empleando equipo convencional y al final se hace una comparación de los resultados obtenidos con ambas metodologías.

## Determinación de parámetros eléctricos de acuerdo a IEEE 112-2004

En la norma IEEE, se menciona el procedimiento para llevar cabo la determinación de los parámetros eléctricos en un motor de inducción, esta metodología se realiza de acuerdo al siguiente procedimiento:

### Prueba para determinar la resistencia del estator

La medición de la resistencia del estator ( $R_s$ ) se puede obtener alimentando con una fuente de corriente directa los devanados del estator. Experimentalmente se puede realizar de dos formas principalmente:

1. La resistencia efectiva por fase del estator a corriente directa, se pudiera medir aplicando una alimentación a los devanados del estator mediante una fuente regulable de corriente directa y luego aplicar las correcciones del efecto pelicular y la corrección por temperatura (Recomendada por la norma IEEE).
2. La resistencia efectiva por fase del estator a corriente directa, se pudiera medir mediante un puente de RLC, luego se le aplicaría la corrección por temperatura (Método experimental).

En este trabajo se verá el propuesto por la IEEE; a la resistencia obtenida se le aplicará una corrección por temperatura. La corrección por temperatura permite obtener la resistencia a la temperatura de trabajo. La prueba para determinar la resistencia del estator se realiza a corriente continua, pues de esta forma no hay tensión inducida en el circuito del rotor y no hay flujo de corriente resultante en él. Además la reactancia del motor es cero a corriente directa

[1]

Por lo tanto lo único que va a limitar el flujo del corriente en el motor es la resistencia en el estator.

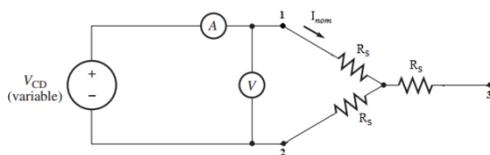
**Medición alimentando el embobinado con una fuente variable de corriente directa**

Para la realización de este ensayo se utilizaron un amperímetro, un voltímetro y una fuente variable con las siguientes características descritas en la tabla 1.

| Instrumento                   | Características              | Cantidades |
|-------------------------------|------------------------------|------------|
| Fuente de Voltage DC variable | Topward 6303D-1<br>0 V-500 V | 1          |
| Amperímetro                   | Fluke 337<br>600 V, 1000 A   | 1          |
| Voltímetro                    | Fluke 87-V                   | 1          |

**Tabla 1** Instrumentos utilizados en la prueba.

El diagrama de conexión del motor a la fuente de alimentación de corriente continua se hace de la siguiente manera:



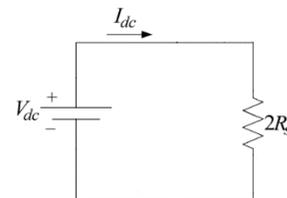
**Figura 1** Diagrama de conexión para medir la resistencia de estator.

Se realizaron las mediciones de la resistencia del estator entre cada una de las fases (1-2, 2-3 y 1-3), y los resultados se muestran a continuación en la tabla 2.

| Bornes | Amperímetro (A) | Voltímetro (V) |
|--------|-----------------|----------------|
| 1-2    | 1,4             | 26,8           |
| 2-3    | 1,4             | 27             |
| 3-1    | 1,4             | 26,9           |

**Tabla 2** Mediciones de la resistencia del estator.

Con la reducción del circuito equivalente por medio de la conversión estrella- delta, encontramos la resistencia del estator como:



**Figura 2** Circuito equivalente resultante de la resistencia del estator.

$$R_{cd} = \frac{V_{cd}}{2I_{cd}} = \frac{27 V}{2 * 1.4 A} = 9.6428 \text{ ohms} \quad (1)$$

Donde:

$R_{cd}$ : Resistencia a corriente directa (ohms)

$V_{cd}$ : Voltaje a corriente directa (Volts)

$I_{cd}$ : Corriente directa nominal. (Amperes)

Esta resistencia fue medida a una temperatura ambiente de 25 °C. Para lograr obtener una resistencia del estator lo más cercano a las condiciones de trabajo del motor se realiza una corrección por temperatura. La siguiente expresión es la recomendada por la IEEE [2].

$$R_b = \frac{R_a(t_b + k_1)}{t_a + k_1} \quad (2)$$

Donde:

$R_a$ : Resistencia que se conoce a una temperatura  $t_a$  (ohms).

$t_a$ : Temperatura a la que fue medida  $R_a$  (°C).

$t_b$ : Temperatura a la cual se requiere hallar  $R_b$  (°C).

$R_b$ : Resistencia que se desea determinar a una temperatura  $t_b$  (ohms).

$k_I$ : es 234.5 para 100 % cobre, o 225 para el aluminio [2].

El motor permite un aumento de la temperatura de 40 °C por encima de la temperatura ambiente. Se determinó la resistencia del estator a 65 °C y se obtuvo el siguiente resultado:

$$R_b = \frac{9.6428(65 + 234.5)}{(25 + 234.5)} = 11.1291 \text{ ohms}$$

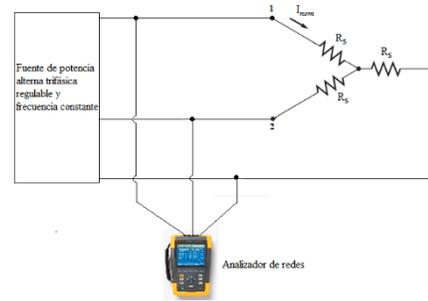
Conclusión de la prueba de corriente directa.

La resistencia de estator ( $R_s$ ) es igual a **11.1291 Ω**.

**Prueba en vacío**

La prueba en vacío a un motor de inducción es de gran importancia pues permite determinar las pérdidas rotacionales del motor e información acerca de los parámetros del núcleo. Esta prueba consiste en hacer girar el motor sin ninguna carga en el eje y alimentado por el estator a frecuencia nominal y tensión nominal. En la figura 3 se muestra el esquema de conexión utilizado para realizar esta prueba.

Básicamente lo que muestra el esquema es la conexión de un analizador de redes en la entrada de la alimentación del motor. La prueba se realizó de manera tal de que el aumento de la tensión fuera de manera controlada hasta llegar la tensión nominal del motor.



**Figura 3** Esquema para el ensayo en vacío.

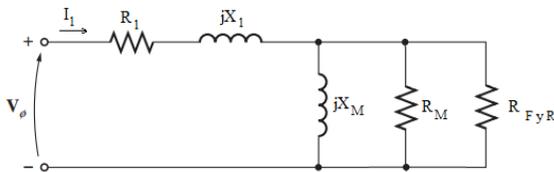
En la tabla 3, se muestra los resultados de las mediciones obtenidas para la prueba de vacío del motor de inducción en cuestión.

| Incremento del Voltaje (%) | 10   | 30   | 50    | 70    | 90    | 100   | 110   |
|----------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Voltaje de fase (V)        | 13.8 | 38.2 | 63.2  | 88.8  | 114.2 | 127.3 | 134   |
| Voltaje de línea (V)       | 22.2 | 65.9 | 109.8 | 154.2 | 198.3 | 220.2 | 232.5 |
| Corriente de fase (A)      | 0.3  | 0.5  | 0.7   | 0.9   | 1.2   | 1.5   | 1.7   |
| Potencia absorbida (kW)    | 0.02 | 0.02 | 0.03  | 0.05  | 0.09  | 0.11  | 0.13  |
| Factor de potencia         |      |      | 0.29  | 0.29  | 0.3   | 0.3   | 0.3   |

**Tabla 3** Resultados de la prueba de vacío.

La única carga en el motor son las pérdidas por fricción y por rozamiento con el aire, por lo que todas las  $P_{conv}$  del motor se consumen en pérdidas mecánicas y el deslizamiento del motor es muy pequeño (alrededor del 0.001) [1]. En la figura 4, se puede ver el circuito equivalente de este motor.

Con este deslizamiento tan pequeño, la resistencia que corresponde a la potencia convertida,  $R_R(1-s)/s$ , es mucho mayor que la resistencia que corresponde a las pérdidas en el cobre del rotor  $R_R$  y mucho mayor que la reactancia del rotor  $X_2$ . En este caso, el circuito equivalente se reduce aproximadamente al último circuito de la figura 4. En donde el resistor de salida está en paralelo con la reactancia de magnetización  $X_M$  y las pérdidas en el núcleo  $R_C$ .



**Figura 4** Circuito equivalente de motor de inducción.

Las pérdidas en el cobre del estator se calculan mediante la expresión:

$$P_{pce} = 3 * I_1^2 * R_S \quad (3)$$

$$P_{pce} = 3 * (1.5)^2 * 11.1291$$

$$P_{pce} = 75.12 \text{ W}$$

Donde:

$P_{pce}$ : Pérdidas en el cobre del estator.

$I_1$ : Corriente medida a tensión nominal.

Para un motor de inducción en marcha en vacío, la potencia de entrada viene dada por:

$$P_0 = P_{pce} + P_{núcleo} + P_{F y R} + P_{Miscel} \quad (4)$$

Donde:

$P_0$ : Potencia de vacío.

$P_{núcleo}$ : Pérdidas en el núcleo.

$P_{f y r}$ : Pérdidas por fricción y rozamiento.

$P_{miscel}$ : Pérdidas por miscelánea.

Las pérdidas rotacionales de un motor de inducción se puede expresar por medio de:

$$P_{Rot} = P_{núcleo} + P_{F y R} + P_{Micelaneas} \quad (5)$$

Despejando de la ecuación (4) se obtiene que:

$$P_{rot} = P_0 - P_{pce} \quad (6)$$

Sustituyendo los valores se obtiene que:

$$P_{rot} = 34.88 \text{ W}$$

### Prueba a Rotor Bloqueado

La prueba de rotor bloqueado en un motor de inducción se llevó a cabo para determinar los parámetros del circuito equivalente del motor. Cuando se menciona prueba de rotor bloqueado en un motor de inducción, es similar a decir prueba de cortocircuito un transformador.

### Bloqueo total de rotor del motor de inducción

Este es el método más común de realizar esta prueba. Consiste en bloquear de una forma segura logrando así que este no gire. Bajo la condición de rotor bloqueado el deslizamiento es ( $s=1$ ) y la resistencia de carga  $R_2$  será próximo a cero.

Para realizar la prueba se alimenta el motor con una fuente de corriente alterna y se ajusta el valor de la tensión de alimentación hasta alcanzar la corriente nominal a plena carga; cuando se alcanza este valor de corriente se mide el valor de tensión alcanzado y la potencia que se consume en el motor. En la figura 5 se muestra las conexiones para esta prueba.

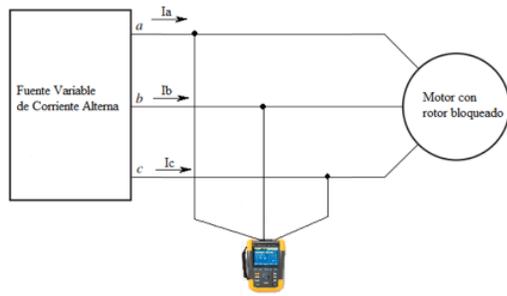


Figura 5 Esquema de prueba a rotor bloqueado.

| Parámetro          | Fase A   | Fase B  | Fase C  | Total   |
|--------------------|----------|---------|---------|---------|
| Voltaje de Fase    | 25.9 V   | 26 V    | 25.8 V  |         |
| Voltaje de Línea   | 44.6 V   | 44.5 V  | 44.5 V  |         |
| Corriente de línea | 1.3 A    | 1.4 A   | 1.4 A   |         |
| Frecuencia         | 59.97 Hz |         |         |         |
| Potencia activa    | 0.02 kW  | 0.03 kW | 0.03 kW | 0.08 kW |
| Potencia activa    | 0.03 kW  | 0.04 kW | 0.04 kW | 0.11 kW |
| Potencia activa    | 0.02 kW  | 0.03 kW | 0.03 kW | 0.07 kW |
| Factor de potencia | 0.71     |         |         |         |

Tabla 4 Resultados de la prueba a rotor bloqueado.

Como se había dicho anteriormente puesto que el rotor no se mueve, el deslizamiento ( $s=1$ ) y por lo tanto la resistencia del rotor ( $R_R/s$ ) es igual a  $R_R$  (un valor bastante pequeño). Debido a que  $R_R$  y  $X_2$  son tan pequeños, casi toda la corriente de entrada fluye a través de ellos, en lugar de a través de la reactancia de magnetización  $X_M$  que es mucho más grande. Por lo tanto, el circuito en estas circunstancias se ve como una combinación en serie de  $X_1$ ,  $R_s$ ,  $X_2$  y  $R_R$  [1], como se observa en la figura 6.

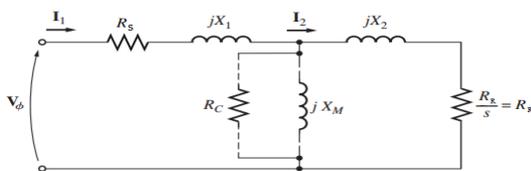


Figura 6 Circuito equivalente sin la rama del núcleo.

A partir de las mediciones de los parámetros de esta prueba y utilizando como guía el circuito de la figura 6, se obtuvieron los siguientes parámetros:

$$I_{L\ prom} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} = 1.4\ A \quad (7)$$

Donde:

$I_{L\ prom}$ : Corriente de línea promedio en (Amper).

La impedancia a rotor bloqueado se puede calcular mediante:

$$Z_{RB} = \frac{V_f}{I_{L\ prom}} = \frac{25.8}{1.4} = 18.428\ \Omega \quad (8)$$

Donde:

$Z_{RB}$ : Impedancia a rotor bloqueado en (Ohms).

O podría también calcularse mediante:

$$Z_{RB} = \frac{V_L}{\sqrt{3} * I_{L\ prom}} = 18.4\ \Omega \quad (9)$$

Se puede determinar la resistencia a rotor bloqueado ( $R_{RB}$ ) mediante la siguiente expresión:

$$R_{RB} = Z_{RB} * \cos\theta = 13.083 \quad (10)$$

Donde:

$R_{RB}$ : Resistencia a rotor bloqueado (Ohms).

$\theta$ : es el ángulo del factor de potencia ( $44.765^\circ$ ).

Si se observa el circuito equivalente de la figura 2.1.3.1,

$$R_{RB} = R_s + R_R \quad (11)$$

Despejando la ecuación y sustituyendo el valor de la resistencia del estator se obtiene que:

$$R_R = 13.083 - 11.1291 = 1.954 \Omega$$

De manera similar se calcula la reactancia a rotor bloqueado ( $X_{RB}$ ):

$$X_{RB} = Z_{RB} * \text{sen}\theta = 12.995 \Omega \quad (12)$$

De acuerdo a la norma IEEE 112 para los motores de inducción clase B la relación:

$$\frac{X_1}{X_2} = 0.67 \quad (13)$$

Por lo tanto:

$$X_1 = 0.4 * X_{RB} = 0.4 * 12.995 = 5.198 \Omega$$

La reactancia en el rotor sería:

$$X_2 = 0.6 * X_{RB} = 0.6 * 12.995 = 7.797 \Omega$$

Solo queda determinar la reactancia de magnetización, la cual es igual a:

$$X_M = |Z_{SC}| - X_1 \quad (14)$$

Donde:

$X_M$ : Reactancia de magnetización.

$Z_{sc}$ : Impedancia sin carga.

La impedancia sin carga se obtiene mediante la expresión:

$$Z_{SC} = \frac{V_f}{I_f} = 84.6 \Omega \quad (15)$$

Sustituyendo en la ecuación (15) se determina que la reactancia de magnetización ( $X_M$ ) es de  $79.46 \Omega$ .

## Resultados

En un resumen de resultados obtenidos mediante las pruebas realizadas siguiendo la IEEE 112-2004, se obtienen los parámetros de circuito equivalente del motor de inducción.

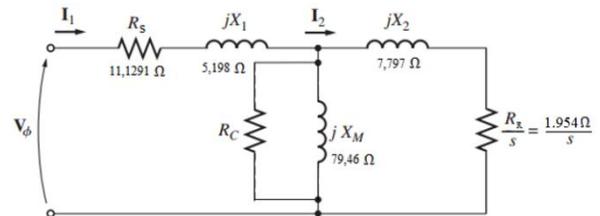


Figura 7 Circuito equivalente con los parámetros calculados.

## Resistencia de estator

Utilizando el procedimiento de la norma IEEE:

$$R_s = 11.1291 \Omega.$$

## Prueba de vacío

$$P_{pce} = 75.12 \text{ W}$$

$$P_{rot} = 34.88 \text{ W}$$

## Prueba a rotor bloqueado

Utilizando el procedimiento de la norma IEEE:

$$R_r = 1.954 \Omega$$

$$X_M = 79.46 \Omega$$

$$X_1 = 5.198 \Omega$$

$$X_2 = 7.797 \Omega$$

**Determinación de parámetros eléctricos por medios experimentales alternativos**

A continuación se describe la metodología alternativa para la determinación de parámetros de un motor de inducción, considerando el uso de equipamiento convencional, para esto se utilizaron los siguientes equipos que se mencionan en la tabla 5.

| Instrumento | Características            | Cantidades |
|-------------|----------------------------|------------|
| Puente RLC  | GWINSTEK LCR-916           | 1          |
| Amperímetro | Fluke 337<br>600 V, 1000 A | 1          |
| Voltímetro  | Fluke 87-V                 | 1          |

Tabla 5 Instrumentos utilizados.

Los parámetros determinados fueron los mismos que la norma IEEE-112, para su posterior comparación.

**Prueba para determinar la resistencia del estator**

El esquema de conexión para medir la resistencia de estator con el puente RLC, se muestra en la siguiente figura:

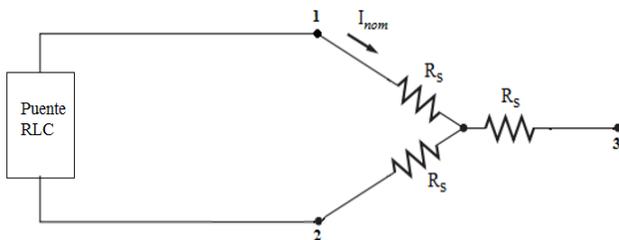


Figura 8 Esquema de conexión del puente RLC.

Para la utilización del puente RLC primeramente se calibró de acuerdo al procedimiento descrito en el manual de operación y se midió la resistencia del estator.

Los resultados se muestran en la siguiente tabla 6.

| Bornes | Impedancia      |
|--------|-----------------|
| 1-2    | 18.35 ∠ 57° Ω   |
| 2-3    | 18.32 ∠ 56.9° Ω |
| 3-1    | 18.34 ∠ 57.2° Ω |

Tabla 6 Resultados utilizando el puente.

Convirtiendo a forma binómica las impedancias del estator se obtiene que:  $Z=9.99+j15.35$

Se dice entonces que la resistencia del estator a una temperatura de 25°C es de 9.99 Ω, realizando la conversión de acuerdo a la norma IEEE 112, la resistencia del estator a la temperatura de trabajo del motor se tiene que:

$$R_b = \frac{R_a(t_b + k_1)}{t_a + k_1} \tag{16}$$

Sustituyendo el nuevo valor de resistencia en la expresión de la ecuación (2) se obtiene

$$R_b = \frac{9.99(65 + 234.5)}{(25 + 234.5)} = 11.531 \text{ ohms}$$

La resistencia de estator ( $R_s$ ) es igual a **11.531 Ω**.

**Cálculo de pérdidas**

Utilizando los resultados obtenidos en la prueba de vacío en cuanto a la corriente se refiere se calcula las pérdidas del motor.

$$P_{pce} = 3 * I_1^2 * R_s \tag{17}$$

$$P_{pce} = 3 * (1.5)^2 * 11.531$$

$$P_{pce} = 77.83 \text{ W}$$

Se calculan las pérdidas rotacionales:

$$P_{rot} = P_0 - P_{pce} \quad (18)$$

Sustituyendo los valores se obtiene que:

$$P_{rot} = 32.17 \text{ W}$$

### Medición de los parámetros del rotor mediante el puente RLC

Mediante el puente RLC se realiza una medición directa en el rotor. La medición se realizó colocando los electrodos de medición directamente en los anillos de cortocircuito del rotor. Esta medición arrojó como resultado que la impedancia en el rotor es de  $0.001 \angle 1.3^\circ \Omega$  que convirtiéndolo a su forma binómica en  $Z = 0.0099 + j0.000268$ . Como se puede apreciar medir el rotor de esta manera no es correcto pues el resultado arrojado es completamente erróneo.

### Prueba de rotor bloqueado alternativa

La prueba a rotor bloqueado se puede realizar sin la necesidad de bloquear el rotor, solo aplicando la corriente nominal al estator del motor de inducción. Este procedimiento consiste en retirar el rotor del motor, aplicando únicamente el valor de la corriente nominal al estator por medio de una fuente variable de corriente y se incrementa la corriente hasta lograr la nominal, en ese punto se tomaron las mediciones siguientes:

| Parámetro          | Fase A  | Fase B  | Fase C  | Total   |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|
| Voltaje de Fase    | 21.07 V | 21.06 V | 21.08 V |         |
| Voltaje de Línea   | 36.6 V  | 36.4 V  | 36.6 V  |         |
| Corriente de línea | 1.4 A   | 1.4 A   | 1.4 A   |         |
| Frecuencia         | 60 Hz   |         |         |         |
| Potencia activa    | 0.02 kW | 0.03 kW | 0.02 kW | 0.07 kW |
| Potencia activa    | 0.03 kW | 0.03 kW | 0.04 kW | 0.1 kW  |
| Potencia activa    | 0.02 kW | 0.03 kW | 0.02 kW | 0.07 kW |
| Factor de potencia | 0.7     |         |         |         |

**Tabla 7** Tabla de resultado.

Aplicando la misma metodología para el cálculo de los parámetros de acuerdo a la norma IEEE-112, se obtienen los siguientes resultados.

$$I_{L \text{ prom}} = 1.4 \text{ A}$$

$$Z_{RB} = 15.57 \Omega$$

$$R_{RB} = 10.53 \Omega$$

$$R_r = 0.79 \Omega$$

$$X_{RB} = 13.248 \Omega$$

$$X_M = 79.301 \Omega$$

$$X_l = 5.299 \Omega$$

$$X_2 = 7.949 \Omega$$

### Comparación de resultados.

Después de haber obtenidos todos los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción utilizando los dos métodos, se puede realizar una tabla comparativa para ver las desviaciones respecto a cada una de las metodologías como se muestra

| Parámetros | Resultados (IEEE) | Resultados (Ensayos) | % Diferencia |
|------------|-------------------|----------------------|--------------|
| $R_s$      | 11.1291 $\Omega$  | 11.531 $\Omega$      | 3.48         |
| $R_r$      | 1.954 $\Omega$    | 0.79 $\Omega$        | 58           |
| $X_M$      | 79.46 $\Omega$    | 79.301 $\Omega$      | 0.2          |
| $X_l$      | 5.198 $\Omega$    | 5.299 $\Omega$       | 2            |
| $X_2$      | 7.797             | 7.949 $\Omega$       | 1.91         |
| $P_{pce}$  | 75.12 W           | 77.83 W              | 3.4          |
| $P_{rot}$  | 34.88 W           | 32.17 W              | 7.79         |

Tabla 8 Tabla de resultados generales.

Como se observa la diferencia de resultados entre en un método y otro es muy pequeña solo existe una gran diferencia en el valor obtenido de la resistencia del rotor, esto es debido a que no se considera dentro de la medición la reactancia de dispersión debido a los materiales del rotor tomando en cuenta únicamente el campo magnético del estator en la velocidad de sincronismo, aunque esta diferencia es menor del 1%.

### Conclusiones

El método alternativo implementado sirve para determinar los parámetros en un motor de inducción. Se recomienda seguir los criterios establecidos por la IEEE, pero en una situación donde no se tengan las condiciones necesarias para cumplirlas, este método alternativo puede ser una variante que permite estimar de manera aproximada los parámetros del circuito.

### Agradecimiento

Quisiera agradecer a CONACYT por la beca otorgada para realizar mi Maestría en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato. A mis compañeros de la maestría por el apoyo en el desarrollo de este trabajo.

### Referencias

- [1] Chapman, S. J. “Máquinas eléctricas”. Editorial McGrawHill-Interamericana, Cuarta Edición. México 2005.
- [2] IEEE 112-2004: “Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators”
- [3] Fitzgerald, A. E., C. Kmgley, Jr., y S. D. Umans. “Electric Machinery”. 5<sup>th</sup> ed. New York. McGraw Hill, 1990.
- [4] Frailes Mora, “Máquinas Eléctricas”. Editorial McGraw Hill – Interamericana, 2003.
- [5] Sadiku, Alexander. Fundamentos de circuitos eléctricos. Editorial Mc Graw Hill, México, 2000.
- [6] M. Kostenko, L.Piotrovski. Máquinas Eléctricas II 1ra Edición.
- [7] K.S. Huang, Q.H. Wu, D.R. Turner “Effective identification of induction motor parameters base don fewer measurements”, IEEE Transaction on energy conversión, Vol. 17 No. 1, March 2002.
- [8] A. Gastli, “Indetification of induction motor equivalent circuit parameters using the single-phase test”, IEEE Transaction on energy conversión”, Vol. 14, No.1, March 1999.

## Navegación multi-objetivos para robots móviles en entornos con obstáculos

VÁZQUEZ-SANTACRUZ, J\*†, PORTILLO-VELEZ, R, MARÍN-URIAS, L y PORRAGAS-BELTRÁN, L.

*Universidad Veracruzana, Lomas del estadio s/n, Edificio*

Recibido Julio 4, 2016; Aceptado Septiembre 5, 2016

### Resumen

En este trabajo se plantea una estrategia de navegación con objetivos para robots móviles, basada en condiciones geométricas de un entorno de trabajo. El problema se aborda a partir de descomposiciones y triangulaciones poligonales del espacio de trabajo; y un controlador asintótico que permite a los robots desplazarse de un punto a otro sin conocimiento inicial de las condiciones del ambiente. En la estrategia se diseña un algoritmo de generación de rutas basado en características de visibilidad hacia una meta global en función de la existencia de obstáculos fijos o móviles, mismos que permiten definir la existencia de puntos auxiliares de control como mínimos locales en el problema de convergencia hacia una meta global. El proceso involucra conmutaciones de referencias cuando, sin que se haya alcanzado un mínimo local, el robot encuentre mejores condiciones de posicionamiento con visibilidad plena hacia el objetivo.

**Robot móvil, Navegación, Obstáculos móviles, Colisión**

### Abstract

This paper addresses the navigation problem for mobile robots under uncertain working conditions. It is assumed that the environment is unknown at the beginning of any experiment and that a visual feedback module supports the navigation strategy to make a set of robots achieve a goal in an environment with obstacles. The proposed navigation algorithm depends on the obstacle localization, and it is based on visibility conditions of the goal and control points that are defined from the geometric distribution of the environment.

**Mobile Robot, Navigation algorithm, mobile obstacles**

**Citación:** VÁZQUEZ-SANTACRUZ, J, PORTILLO-VELEZ, R, MARÍN-URIAS, L y PORRAGAS-BELTRÁN, L. Navegación multi-objetivos para robots móviles en entornos con obstáculos. Revista de Sistemas Experimentales 2016, 3-8: 18-26

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: alejanvasquez@uv.mx)

†Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Problemas como exploración y transporte de materiales requieren de soluciones que pueden ser atendidas por algoritmos de navegación autónoma de un conjunto de robots móviles trabajando de forma sincronizada. En general, los algoritmos para navegación de robots móviles han tenido un crecimiento en la actualidad. En [7] se presenta una revisión del estado del arte en el tema de navegación para robots móviles. Con respecto a la generación de esquemas que doten de autonomía a un robot para poder desplazarse ágilmente en un entorno desconocido, algunos enfoques importantes usan herramientas probabilísticas de localización [2], [4]; mientras que en [3] se implementa una estrategia de navegación haciendo uso de localización basada en sistemas inalámbricos sensoriales. Con respecto a las condiciones de colisión entre robots en entornos con obstáculos, en [14] se desarrolla una revisión de esquemas de navegación con obstáculos. Los métodos de reconocimiento y modelado del entorno han sido abordados en [8], donde se aborda una estrategia basada en redes neuronales, o en [12], donde la conectividad de diversos puntos sensoriales define el espacio de trabajo, o en [13], donde se desarrolla un mapeo basado en sensores y cuadrículas de ocupación.

Por su parte, la consideración de obstáculos móviles cuando más de un robot se desenvuelve en un entorno, define un obstáculo en movimiento con el que hay que lidiar. En [15] se aborda la definición de puntos de control para efectos de guía en ambientes con objetivos dinámicos. Para problema de navegación con objetivos, enfoques como [10] abundan en el problema clásico de un par de agentes en el que uno de ellos busca atrapar al otro en un espacio poligonal cerrado. En ese trabajo se definen algoritmos de avance y localización garantizando una convergencia al objetivo en tiempo finito.

La definición de espacios de trabajo mediante segmentos poligonales también es tratada en [11], donde mediante un sistema de visión, un robot puede navegar de un punto a otro. En [5] se abordan propiedades de descomposición de polinomios convexos para la implementación de el algoritmo de navegación A\*.

En este trabajo se propone una estrategia de navegación mediante polígonos definidos por los obstáculos en un entorno de trabajo; dichos polígonos son la base de la definición de los puntos de referencia que permiten a un conjunto de robots construir su trayectoria hacia la meta. Se considera para efectos demostrativos el uso de dos robots, cuya perspectiva individual del entorno considera obstáculos fijos, así como un obstáculo móvil dado por el otro robot siguiendo su propia trayectoria.

El trabajo está estructurado como sigue: en la Sección 2 se describe a detalle el problema abordado y la estrategia general a seguir, incluyendo la definición del entorno de trabajo y el algoritmo de navegación. En la Sección 3 se aborda el sistema de control y una discusión general sobre la convergencia en tiempo finito del algoritmo para cada robot. La plataforma experimental y descripción de los experimentos es tratada en la Sección 4 y, finalmente, se presentan algunas conclusiones y trabajo futuro en la Sección 5.

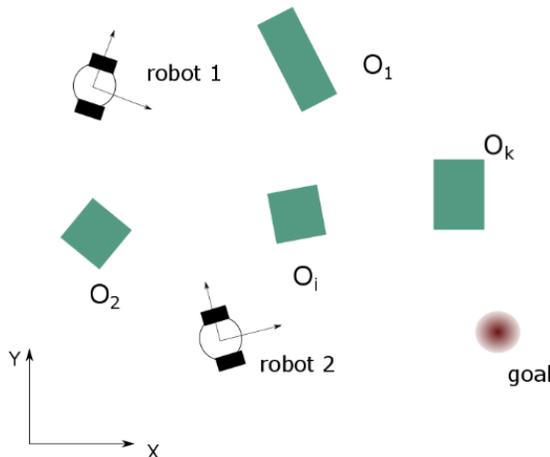
## Definición del problema

El escenario de trabajo considera dos robots del tipo diferencial cuya tarea consiste en desplazarse desde un punto inicial hasta una meta global individual  $M_m$  cuya posición es conocida, en un entorno con obstáculos originalmente desconocido.

La posición de cada robot y los obstáculos es determinada por un sistema de localización absoluto fijo en la parte superior del espacio de trabajo. Aunque el problema bien podría definirse para un conjunto de  $n$  robots, en cuyo caso se dispondría de un ambiente dinámico genera con obstáculos en movimiento, en este trabajo se plantea la definición de una estrategia para solo dos de ellos sin pérdida de generalidad.

En la Figura 1 se muestra el ambiente de operación de los robots  $R_m$  cuya meta esta dispuesta de tal forma que deban evadirse  $k$  obstáculos para alcanzarla.

El método de navegación y arribo a la meta, considera el uso de puntos de control  $Pc$  que se definen mediante triangulación poligonal. Los puntos de control definidos desempeñan el papel de mínimos locales que mediante un controlador asintótico bien definido son buscados a fin de que el robot  $R_m$  pueda posicionarse mejor para alcanzar el mínimo global definido por la meta  $Mm$ .



**Figura 1** Escenario de trabajo.

### A. Triangulación y Puntos de control

El robot  $R_m$  parte de una posición  $Pr_m = [x_r(0), y_r(0), \Theta_r(0)]^T$ , con conocimiento pleno de la posición de la meta,  $PMm = [xMm, yMm]^T$ , constante. Por otro lado, el acceso en tiempo real a un sistema de localización absoluta, permite identificar la posición de cada posible obstáculo  $Poj = [xoj, yoj]^T$ , con  $j = 1, 2, \dots, k$ . Antes de comenzar la navegación por parte del robot  $R_m$ , se lleva a cabo una reconstrucción preliminar del área de trabajo, la cual ubica y considera la distribución de obstáculos y resto de robots en el mismo espacio para identificar una posible ruta. En función de esta información, se define un polígono, utilizando como vértices, los puntos  $Poj$  que definen la posición de cada obstáculo. Naturalmente, la definición del polígono puede tener múltiples formas, por lo que se define en este caso a partir de un obstáculo aleatorio como vértice inicial  $P1$  y se analiza una ruta que conecte de manera continua todos los obstáculos sin intersección hasta regresar al vértice inicial. De este modo, el resultado es un polígono de  $k$  lados, el cual se divide para la obtención de  $(k - 2)$  triángulos [6] como se observa en la Figura 2.

Los puntos de control  $Pci$ , con  $i = 1, \dots, (2k - 3)$ , eventualmente tendrán el papel de mínimos locales, y se definen como los puntos medios de los  $(2k - 3)$  trazos resultantes de la definición del polígono y su triangulación, tal como se muestra en la misma Figura 2. Nótese que la triangulación reduce una forma compleja en una colección de formas geométricas simples mediante diagonales internas sin intersección, definidas mediante a interconexión de dos vértices no consecutivos dentro del polígono [16].

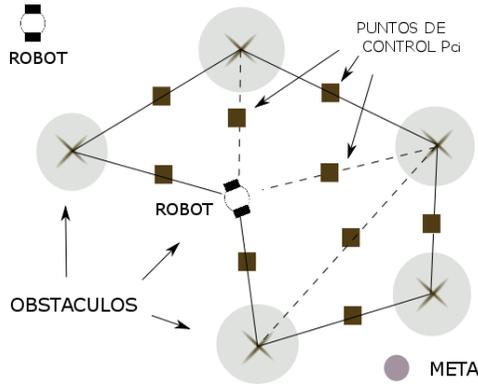


Figura 2 Triangulación y puntos de control.

Estos puntos sirven de referencia cuando la meta  $M_m$  no es alcanzable; en este caso, el robot  $R_m$  deberá decidir sobre cuál punto de control  $P_{ci}$  es adecuado para reubicarse en busca de una mejor visibilidad de la meta. Esto sin embargo, no implica que deba pasar por todos los puntos definidos, lo que definiría una solución poco práctica en tiempo de convergencia. Consecuentemente, es necesario identificar el progreso del robot hacia la meta a través de una métrica de desarrollo  $\delta r$ , la cual que indique la evolución del proceso de tal modo que se garantice la llegada del robot a la meta en un tiempo finito.

B. Algoritmo de navegación

Dado el conocimiento de la posición de la meta, se define una función lineal  $\xi_{segm}$  cuyo dominio  $\gamma_{\xi m}$  es tal que  $|P_{rxm}| \leq \gamma_{\xi m} \leq |P_{Mxm}|$ , esto es, se define a partir del rango de coordenadas de la posición del robot  $R_m$  a la meta  $M_m$  a lo largo del eje X. Esta función en todo momento es evaluada con respecto a su continuidad, la cual está asociada con la posible intersección con obstáculos como se muestra en la Figura 3, donde claramente  $R_2$  pierde visibilidad hacia su respectiva meta debido a la presencia de un obstáculo.

De esta manera, la visibilidad de la meta desde el robot puede definirse como sigue:

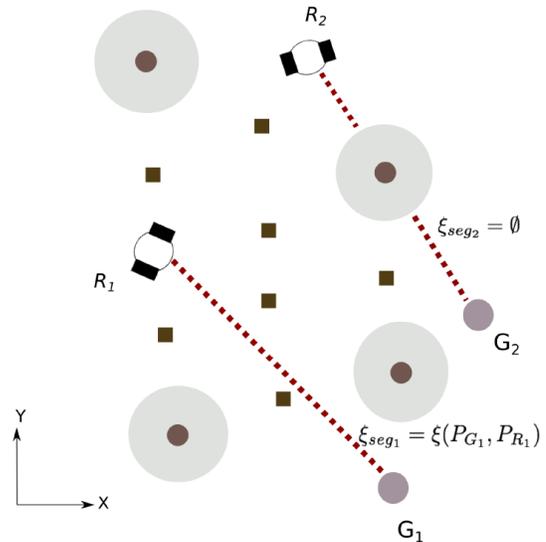


Figura 3 Evaluación de visibilidad hacia la meta.

$$\xi_{seg} = \begin{cases} \emptyset & \text{si } \exists \gamma \in \gamma_{\xi m} : \xi(\gamma) = \eta_j(\gamma) \\ \xi(P_{Mm}, P_{Rm}) & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (1)$$

Donde  $\eta_j(\cdot)$  define una área de influencia de un obstáculo  $i$ , que por simplicidad se define de forma circular, como lo muestran las zonas sombreadas en la Figura 2.

La ecuación (1) define una posible pérdida de visibilidad cuando el segmento lineal que une la meta  $M_m$  con el robot  $R_m$ , coincide con un obstáculo en un dominio común  $\gamma \in \gamma_{\xi m}$  en cuyo caso  $\xi_{seg}$  no está definida. En esta instancia, en busca de una nueva ruta libre de obstáculos, se plantean objetivos parciales de control que eventualmente permitirán al robot posicionarse mejor y definir nuevamente la función  $\xi(P_{Mm}, P_{Rm})$ , ahora con visibilidad a la meta.

El algoritmo parte de un escenario con los  $(2k - 3)$  puntos de control dentro del polígono definido por los obstáculos. Cuando el robot tiene definida una referencia de control dado por alguno de ellos, entonces tal punto de control  $P_{ci}$  representa un mínimo local y será buscado por un controlador asintótico definido en coordenadas polares como [1],

$$\begin{aligned} v &= k_p \rho \\ \omega &= k_\alpha + k_\phi \phi \end{aligned} \quad (2)$$

Donde  $\rho = \|PM_m - PR_m\|$ ,  $k_p$ ,  $k_\alpha$  y  $k_\phi$  son ganancias de control, con parámetros auxiliares  $\alpha$  y  $\phi$  definidos en la Figura 4, donde se describe gráficamente la cinemática de los robots con respecto a la definición de la estrategia de control de la ecuación (2).

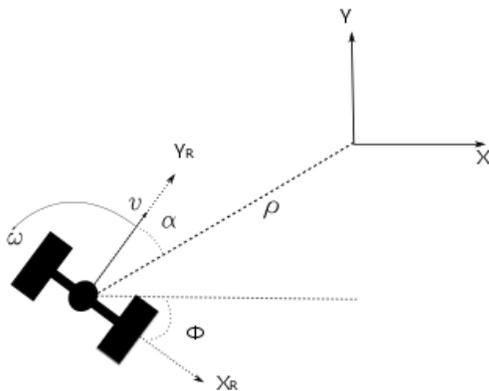


Figura 4 Cinemática del robot .

La estrategia de arribo a la meta global  $M_m$ , consiste en evaluar la interferencia de los segmentos lineales  $\xi$  ( $PM_m$ ,  $PR_m$ ) con posibles obstáculos. En función de esto y de acuerdo a la ecuación (1), al existir visibilidad plena el robot buscará la meta, o bien, al ser interrumpido el segmento lineal, el esquema de navegación determinará algún punto de control desde donde se garantice una visibilidad hacia  $M_m$ .

Sin embargo, bajo esta descripción general no existe garantía de lograr el objetivo global, puesto que múltiples puntos de control pueden satisfacer las condiciones de visibilidad o al contrario, pueden ser visibles para el robot, pero representan una situación sin más posibilidades de dirección; en este caso el robot puede quedar detenido en un mínimo local sin posibilidad alguna de continuar. Situaciones como ésta se muestran en la Figura 5, donde se muestra un caso de bloqueo y un caso con un comportamiento deseado a partir de una misma posición de un robot mediante conectividad de puntos de control.

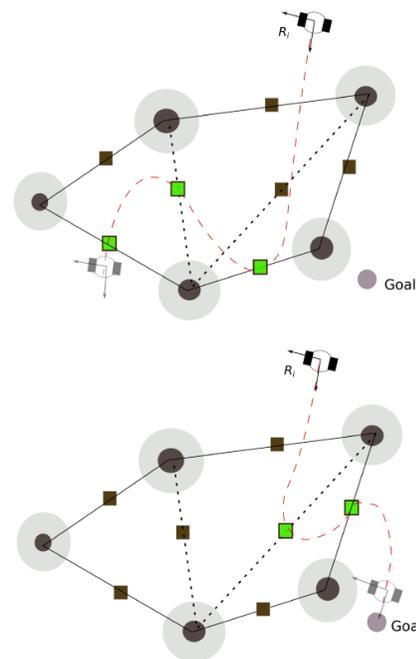


Figura 5 Casos de desempeño de ruta de robot .

### Sistema de control y convergencia en tiempo finito

La solución trivial al problema de convergencia, se presenta cuando el robot dispone de una ruta visible  $\xi$  ( $PM_m$ ,  $PR_m$ ) a la meta, en cuyo caso, el controlador (2), siendo globalmente asintóticamente estable, garantiza la convergencia a la misma.

Sin embargo, en presencia de un obstáculo  $j$  que impida la visibilidad directa, esto es que  $\xi_{seg} = \emptyset$ , el robot determinará como objetivos parciales de control alguno de los puntos de control predefinidos, de tal modo que la métrica de progreso  $\delta r$  tenga un comportamiento monótono que garantice el arribo a la meta en un tiempo finito. Considérese el monitoreo del progreso de navegación a partir de,

$$\delta r = \|PM_m - PR_m\| \tag{3}$$

con un comportamiento deseado de la forma,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \delta r = 0, \tag{4}$$

Que en términos prácticos sugiere que el robot debe acercarse en todo momento a la meta, lo que a su vez delimita a los puntos de control a aquellos que además de la visibilidad, muestren una tendencia a acercarse a la meta. Para tal efecto, la toma de la decisión sobre qué punto de control  $P_{ci}$  es elegido como referencia, se hace mediante la evaluación de dos condiciones: deberá ser el punto de control más cercano a  $M_m$  que sea visible por  $P$ , y deberá existir una ruta que conecte uno o varios puntos de control que concluya con visibilidad plena a la meta  $M_m$ . Esto garantiza que la distancia  $\delta r$  se reduzca y se expresa como,

$$P_{ref} = \{ [x_i, y_i]^T \in \xi(P_{ci}, P_m) | \min(\|P_{ci} - PM_m\|) \}, \\ \exists P_{ci+z} | \xi(P_{ci+z}, P_m) = \emptyset \tag{5}$$

Para  $i = 1, 2, \dots, (2k - 3)$  y con  $z$  un índice que define algún punto de control posterior a  $P_{ci}$ . De este modo, el punto de control visible más cercano a la meta o con salida a la misma,  $P_{ref}$ , tendrá el papel de referencia y el robot buscará llegar a él.

Existe sin embargo, una situación importante para el cumplimiento de (4) en un tiempo aún menor que el destinado a lograr los correspondientes puntos de control. Aunque la ruta generada por el algoritmo puede asociar a más de un punto control, se establece que en todo momento es prioridad la visibilidad de la meta, por lo que durante el proceso de arribo a un punto de control que cumpla con las condiciones (5), éste puede ser interrumpido si la meta logra ser visible. En ese caso, el robot se direcciona en el mismo momento que encuentra la meta y ésta se vuelve la nueva referencia en el control. Se trata de un sistema de interrupciones o "switcheos" cuya convergencia puede ser analizada bajo determinadas circunstancias [9]. El esquema de conmutación se muestra en la Figura 6.

Por otro lado, para garantizar un comportamiento del error decreciente, independientemente de las interrupciones, se deben tener presente el desempeño del controlador (2), el cual garantiza estabilidad exponencial basado en la cinemática del robot móvil diferencial en coordenadas polares ( $\rho$  y  $\alpha$ ). En [1] está demostrado que el movimiento de un punto inicial a uno final del robot, es suave y robusto, garantizando la convergencia exponencial con,

$$k\rho > 0, k\phi < 0, \\ k\alpha + k\phi - k\rho > 0. \tag{6}$$

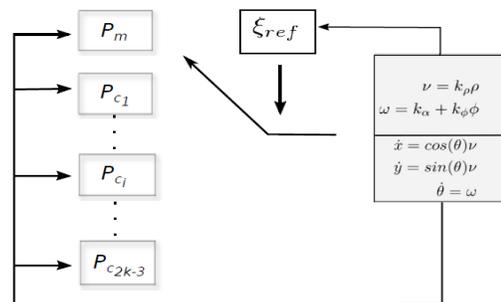


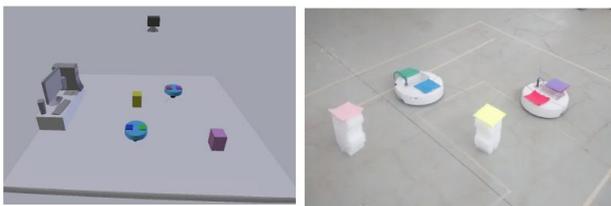
Figura 6 Sistema con conmutaciones.

Como se ha mencionado, esta estrategia de control es usada para posicionar al robot  $R_m$  a cualquier referencia aunque, éstas no necesariamente deban ser alcanzadas totalmente en vista de la repentina visibilidad de la meta global. En este escenario, aunque la estabilidad local y global con respecto a un punto de control es garantizada, la convergencia a la meta requiere la satisfacción de las condiciones (5).

**Plataforma experimental y resultados**

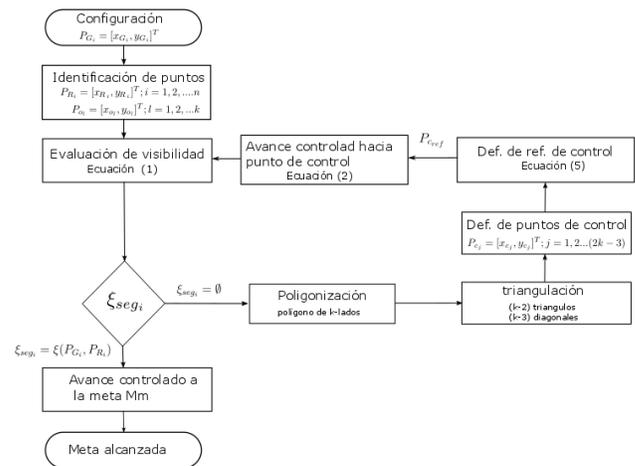
La plataforma de experimentación consiste en un par de robots diferenciales *I-Create*<sup>®</sup> en un espacio de trabajo cubierto por un sistema de localización absoluta que consta de una cámara digital. Se dispone de una PC como sistema de control central con comunicación inalámbrica con cada robot, que han sido adaptados con un módulo de comunicación Bluetooth; y vía alambica con la cámara que identifica en tiempo real la posición de los obstáculos y de cada robot.

En la Figura 7 se muestra la plataforma experimental descrita.



**Figura 7** Plataforma experimental.

En la Figura 8, se describe el funcionamiento general del algoritmo muestra la operación de los experimentos en su funcionamiento general.



**Figura 8** Algoritmo general de funcionamiento.

El robot  $R_m$  es posicionado aleatoriamente en el espacio de trabajo, y es capaz de identificar, con apoyo del sistema de localización, los elementos involucrados para definir una ruta que eventualmente termine en la meta. La duración del experimento es proporcional al número de obstáculos y el efecto de los mismos con respecto a la función de visibilidad.

Los siguientes resultados muestran un experimento con dos obstáculos fijos, por lo que cada robot percibe tres obstáculos, dos fijos y uno móvil. Cada robot parte de una posición aleatoria en el plano XY de operación de 3 m x 2 m.

En la Figura 9 se observa las rutas desarrolladas por cada robot al comenzar en una posición aleatoria del plano, con las metas definidas en el otro extremo correspondiente. Nótese la presencia de dos obtáculos y la zona de influencia de cada uno de ellos, definida por una función circular de 10cm de radio.

Es necesario remarcar que una estrategia de evasión de colisión entre los dos robots se ha implementado de manera simple de tal modo que cuando cada robot entra en la zona de influencia de otro en movimiento, se establece un criterio de prioridad, en el que el robot más cercano a su meta continúa avanzando, mientras el otro se detiene hasta recuperar la ruta libre con visibilidad al objetivo correspondiente. En la Figura, esta situación es susceptible de ocurrir ya que ambos robots intersectan su trayectoria en busca de sus metas.

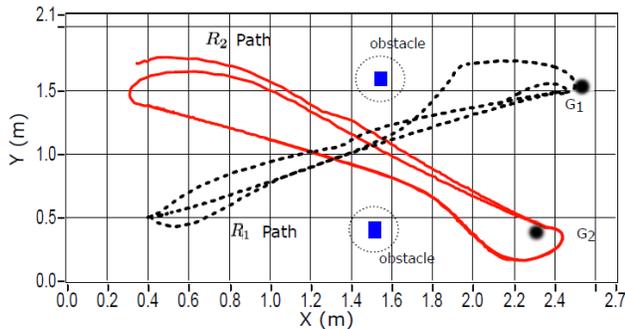


Figura 9 Rutas desarrolladas por cada robot.

El desempeño del controlador se muestra en la Figura 10, donde se puede apreciar el comportamiento de la distancia hacia la meta global, en trayectorias repetidas, correspondientes al experimento mostrado en la Figura 9.

Nótese que para ambos robots, el error inicial decrece con el tiempo en forma repetida, dependiendo la referencia que se actualiza. La gráfica muestra un desemeño global, por lo que las referencias locales dadas por los puntos de control, se perciben de forma mínima en las conmutaciones señaladas, que se producen cuando mejores condiciones de visibilidad surgen.

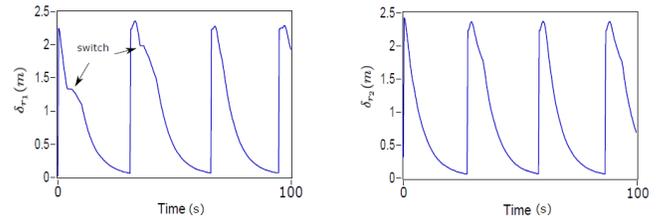


Figura 10 Rutas desarrolladas por cada robot.

### Conclusiones

Los resultados obtenidos validan el planteamiento de navegación propuesto en este trabajo de un modo práctico, permitiendo a un conjunto de robots, desarrollar una estrategia de navegación en un entorno desconocido inicialmente. Como parte del algoritmo, se han definido criterios que garantizan la convergencia del objetivo de control en tiempo finito. El trabajo marca la pauta para definir un escenario más realista, que considere un entorno con una aplicación real en un entorno no controlado; esto sugiere una mejora del trabajo en el que el sistema de retroalimentación visual este a bordo del vehículo, de tal modo que el espacio de trabajo pueda extenderse. Nótese que el algoritmo de navegación es general y por lo tanto puede ser aplicado a otro tipo de robots móviles que utilicen un controlador asintótico.

Una mejora adicional que se ha identificado, es una limitante en las velocidades que el robot puede desarrollar asegurando estabilidad del sistema. Esto se debe a la velocidad de captura de la cámara usada como retroalimentación de posición, por lo que una solución inmediata consiste en adquirir un dispositivo de alta velocidad, o lidiar con alguna estrategia de compensación del retardo que una baja tasa de captura induce en la información de posición de cada robot.

## Referencias

- [1] A. Astolfi. Exponential stabilization of a wheeled mobile robot via discontinuous control. *Journal of Dynamics Systems, Measurements and Control*, 121(1):121–126, 1999.
- [2] Maxim A. Batalin, Gaurav S. Sukhatme, and Myron Hattig. Mobile robot navigation using a sensor network. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 636–642, New Orleans, LA, 2004.
- [3] Joydeep Biswas and Manuela Veloso. Wifi localization and navigation for autonomous indoor mobile robots. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pages 4379–4384, 2010.
- [4] Wolfram Burgard. *Probabilistic Techniques for Mobile Robot Navigation*. Spatial Information Theory, 2005.
- [5] Z. Chen, S. Li, and P. Wang. Mobile robot navigation based on convex polygonal decomposition of environment. *Studies in Surveying and Mapping Science (SSMS)*, 1(4):55–64, 2013.
- [6] Mark de Berg, Otfried Cheong, Marc van Kreveld, and Mark Overmar. *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. Springer, 2008.
- [7] G. N. DeSouza and A. C. Kak. Vision for mobile robot navigation: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(2):237–267, 2002.
- [8] M.Y. Kim, H. Cho, and J.Kim. Obstacle modeling for environment recognition of mobile robots using growing neural gas network. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 1(1):134–141, 2003.
- [9] D. Liberzon. *Switching in systems and Control*. Systems and Control: Foundations and applications, Boston, 1973.
- [10] N. Noori and V. Isler. Lion and man with visibility in monotone polygons. *International Journal of Robotics Research*, 33(1):155–181, 2014.
- [11] Nageswara S. V. Rao. Robot navigation in unknown generalized polygonal terrains using vision sensors. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 25(6):947–962, 1995.
- [12] Nageswara S. V. Rao. *Terrain Model Acquisition By Mobile Robot Teams and n-Connectivity*. Distributed Autonomous Robotic Systems 4, 2000.
- [13] Maki K. Habib. *Real time mapping and dynamic navigation for mobile robots*. International Journal of Advanced Robotics Systems, 4(3):323-338, 2007.
- [14] Michael Hoy, Alexey S. Matveev, and Andrey V. Savkin. *Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex clutter environments: a survey*. Robotica, 33(3):463-497, 2014.
- [15] F. Kunwar, F. Wong, R. Ben Mrad, and B. Benhabib. *Guidance-based on-line robot motion planning for the interception of mobile targets in dynamic environments*. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 47(4):341-360, 2006.
- [16] Nels Johann Lennes. *Theorems on the simple finite polygon and polyhedron*. American Journal of Mathematics, 33(1):37-62, 1911.

## Proceso sustentable de obtención de biodiesel

BAUTISTA-VARGAS, María\*†, GARCÍA-NAVARRO, Josefina, CABRERA-CRUZ, René' y TORRES-MORENO, Ruth.

*Universidad Politécnica de Altamira, Programa Académico de Ingeniería en Energía, Dir. Nuevo Libramiento Altamira – puerto industrial km 1.5, acceso por el km 30 de la carretera Tampico – Mante, C.P. 89600  
'Centro Universitario Tampico-Madero de la Universidad Autónoma de Tamaulipas.*

Recibido Julio 7, 2016; Aceptado Septiembre 13, 2016

### Resumen

La biomasa, se ha convertido en una alternativa viable para la producción de biocombustibles, como lo es el biodiesel. En la presente investigación, se muestra la producción de biodiesel a partir de los residuos de aceite usado de cocina, mediante el proceso de transesterificación con la utilización de un procesador ultrasónico y como catalizadores el hidróxido de potasio y el metanol. Para la obtención del biodiesel se trabajó en tres fases, la primera corresponde al filtrado del aceite, la segunda fase la realización de la transesterificación del mismo y la tercera fase el lavado del biodiesel con agua destilada. De acuerdo a la experimentación realizada, se determinó que en el rango de 30 segundos, de 50 a 100% de amplitud y un ciclo; en comparación, se obtuvo en promedio el 95% del volumen procesado a 60 segundos, con las mismas condiciones, pero contando con la ventaja de no precalentar el aceite antes de procesarlo. Es por ello, la necesidad de poder reutilizar los residuos de aceite de cocina, para llevar a cabo el procesamiento de estos y convertirlos en un biocombustible, impulsando así la economía, las energías renovables y la concientización ambiental.

**Energías Renovables, Proceso Sustentable, Residuo de Aceite Usado de Cocina, Biodiesel, Procesador Ultrasonico**

### Abstract

The biomass have covered in a viable alternative to biofuels production, how to it's a biodiesel. In the present investigation it's show the biodiesel's production as of residue of cooking oil by the transesterification's process with it using of the ultrasonic processor and as catalyst the potassium hydroxide and the methanol. For the obtention of biodiesel we worked in three phases, the first phase be responsible to the filter of oil, the second phase be the realization of the transesterification of the same and the third phase be the biodiesel's washed with distilled water. According to the rewarded experimentation, themselves determinate to the range of 30 seconds of 50 to 100% of amplitude and a one cycle, in a comparison, themselves got in a average of 95% from the processed volume to 60 seconds with the same conditions, but count with the advantage of it don't preheat the oil before of process it. It's therefore, the necessity of we can re-use the residue of cooking oil to carry out the prosecution of this and convert them in a biofuel, it's driving like this the economy, the renewable energy and the environmental awareness.

**Renewable Energy, Sustainable Process, Residue of Cooking Oil, Biodiesel, Ultrasonic Processor**

**Citación:** BAUTISTA-VARGAS, Marí, GARCÍA-NAVARRO, Josefina, CABRERA-CRUZ, René' y TORRES-MORENO, Ruth. Proceso sustentable de obtención de biodiesel. Revista de Sistemas Experimentales 2016, 3-8: 27-35

\*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: esther.bautista@upalt.edu.mx)

†Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El Desarrollo Sustentable, según la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (2013), es el proceso evaluable mediante criterios e indicadores del carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas. La presente investigación pretende atacar los tres criterios, desde el punto ambiental al reutilizar el Residuo de Aceite Usado Cocina (RAUC) como materia prima para la obtención de un biocombustible, disminuyendo así el daño al medio ambiente puesto que este habitualmente es vertido a las aguas y se estima que un litro de aceite contamina cerca de un millón de litros de agua (Brito *et al.*, 2007). Desde el aspecto económico, para un país en desarrollo como lo es México, la producción de biocombustibles atiende los problemas que conlleva la disminución significativa de las reservas de combustibles fósiles obteniendo en el biodiesel un sustituto viable de estos (González *et al.*, 2011). La nueva industria agroenergética, implica una cadena productiva que impacta en forma más directa a los diferentes sectores de la economía, especialmente en lo referente a la generación de empleo y desarrollo agrícola y agroindustrial (Cortés *et al.*, 2008). Y desde el componente social, al usar el aceite usado de cocina como material prima del biodiesel no se compite con el sector alimenticio, contribuyendo así con la cultura de concientización ambiental (Hernández *et al.*, 2008).

El Biodiesel, se define como ésteres de mono alquilo constituidos por cadenas largas de ácidos grasos derivados de los aceites vegetales o animales como resultado de su transesterificación (Rivero *et al.*, 2006).

El proceso de transesterificación consiste en la conversión de los triglicéridos, ésteres de ácidos grasos y glicerol, que conforman los aceites vegetales en metil o etil ésteres de los mismos ácidos grasos. Lo cual se logra, tratando a los aceites vegetales con metanol o etanol en medio ácido o alcalino, obteniendo así la mezcla correspondiente al biodiesel, y como subproducto de la transesterificación se obtiene glicerina (Túqueres, 2015).

La glicerina se puede purificar calentándola a 65.5 °C para evaporar el metanol, esto la hace segura al contacto con la piel, o bien se puede utilizar para producir metano por pirolisis. El transporte y almacenamiento del biodiesel resulta más seguro que el de los Petroderivados, ya que posee un punto de ignición más elevado. El biodiesel puro, posee un punto de ignición de 148°C contra los escasos 51°C del gasoil. La calidad del producto acabado puede comprobarse visualmente y midiendo su pH, el cual debe ser 7, tener un color de aspecto de aceite vegetal con un matiz marrón parecido a la sidra (Meher *et al.*, 2006; Carta *et al.*, 2009).

El metanol requerido debe ser anhidro y tener 99% pureza para evitar la formación de jabones indeseables, se requiere aproximadamente del 15 al 20 % del volumen de aceite a procesar (MA y Hanna 1999; Carta *et al.* 2009; Franco 2013).

Las bases fuertes como el NaOH y el KOH son los catalizadores más usados. Estos hidróxidos presentan altas conversiones a condiciones moderadas y tiempos de reacción cortos, además requieren pequeños volúmenes de alcohol (Mittelbach *et al.*, 2004; Moser, 2009).

Para el proceso de transesterificación se utiliza un procesador ultrasónico, el UP400S (400W, 24kHz) de Reactores Hielscher ultrasónicos. Las oscilaciones ultrasónicas se transmiten a través del sonotrodo, que está en contacto directo con la zona calentada. Este equipo mejora la eficiencia del proceso de transesterificación, en un proceso de transformación convencional los porcentajes de catalizador y alcohol son mayores, así como la cantidad de energía térmica aplicada para favorecer la cinética de reacción (Carta *et al.*, 2009).

Las ondas de ultrasonido son imperceptibles para el oído humano, sin embargo son empleadas en los materiales que se utilizan para la producción de estos combustibles. Manejan pequeños pulsos y son capaces de producir altas temperaturas las cuales separan la parte más viscosa de los aceites, cuya fase es esencial en la obtención del recurso energético. La tecnología de mezclado ultrasónico continuo de Hielscher, mejora el rendimiento de biodiesel y reduce sus costos. La mezcla ultrasónica mejora la emulsificación de metanol en el aceite y genera más y más pequeñas gotitas. Esto conduce a una mejor distribución del catalizador y mayor eficiencia (Meher *et al.*, 2006, Carta *et al.*, 2009; Prafulla *et al.*, 2012).

Es por ello, la necesidad de poder reutilizar los RAUC, para llevar a cabo el procesamiento de estos y convertirlos en un biocombustible, impulsando así la economía, las energías renovables y la concientización ambiental.

### Metodología a Desarrollar.

En la presente investigación se utilizó el método del proceso de transesterificación, para poder determinar el punto óptimo de obtención de biodiesel utilizando el equipo de procesador ultrasónico. Las fases a desarrollar son las siguientes:

1. *Fase de Filtrado*, la cual consiste en remoción de sólidos suspendidos.
2. *Fase del proceso de Transesterificación*, se divide en tres partes: determinación de la acidez, preparación de los reactivos y la muestra, y la utilización del Procesador Ultrasónico, cuyo equipo fue proporcionado al programa académico de Ingeniería en Energía de la Universidad Politécnica de Altamira por el Consejo Tamaulipeco de Ciencia y Tecnología (COTACYT).
3. *Fase de lavado*, es el sometimiento del biodiesel para la remoción de residuos.

### Resultados

La producción de biodiesel se obtuvo a partir de RAUC, con el fin de reducir el daño que este causa al medio ambiente y conocer la factibilidad de este residuo como materia prima para la producción de un biocombustible. Para la obtención de biodiesel se trabajó en tres fases: la primera el filtrado del aceite, la segunda el desarrollo del proceso de transesterificación utilizando el procesador ultrasónico y la tercera el lavado del biodiesel obtenido.

## Fase de Filtrado

Con el fin de eliminar los sólidos suspendidos, producto de los restos de alimentos, del RAUC recolectado, se diseñó un dispositivo de filtrado mecánico.

Para verificar los resultados se midieron parámetros físico – químicos a la muestra antes del filtrado y después del filtrado. Los cuales fueron el pH, que mide el grado de acidez de una solución, se basa en la cantidad de iones de hidrógeno que se encuentran en una solución dada  $pH = -\log [H^+]$ . Cuya escala es logarítmica va desde el 0 hasta el 14. El valor de medición Turbidez, es un parámetro determinante en muchas aplicaciones. Esto es cierto para el procesamiento del agua potable y las aguas residuales, para la elaboración de bebidas y en el campo químico desde la galvanización hasta la industria petroquímica. Al aumentar el número de las partículas aumenta el grado de turbidez también a simple vista. La forma, las dimensiones y la composición de las partículas influyen en el grado de turbidez. Los aparatos de medición que aplican este método se denominan nefelómetros. Los turbidímetros o nefelómetros se diferencian por la fuente de luz que utilizan. Las unidades en las que se mide la turbidez son: Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU). Otros parámetros más subjetivos fueron el color y el olor de la muestra.

En la Figura 1, se puede observar el procedimiento de filtración, obteniéndose las muestras excedentes de sólidos. El dispositivo para el filtrado, fue construido con un tanque de un galón, mangueras transparentes y un filtro de gasolina que se utiliza en automóviles.

Se construyó dicho dispositivo y se procedió a filtrar el RAUC minimizando al máximo los restos de comida que se pudieran encontrar.



**Figura 1** Proceso de Filtración del RAUC.

En la Figura 2, se muestra la realización de pruebas para su determinación de turbidez.



**Figura 2** Pruebas de Turbidez al RAUC filtrado.

En base a esto, en la Tabla 1, se muestran los resultados de la muestra antes del filtrado y después del filtrado, donde se pudo obtener una diferencia en cuanto a valores iniciales que presentó la muestra.

| Parámetros | Antes del filtrado | Después del filtrado |
|------------|--------------------|----------------------|
| Olor       | Quemado            | Aceite               |
| Color      | Rojo oscuro        | Rojo más Claro       |
| pH         | 5                  | 6                    |

**Tabla 1** Resultados de los parámetros de la muestra

## Fase del proceso de Transesterificación

El proceso de transesterificación se lleva a cabo en tres etapas.

1. Determinación de acidez del aceite ya filtrado.

Se disolvieron 30 ml de aceite de cocina usa en 300 ml de alcohol isopropílico a baño maría por 15 minutos, para obtener 3 muestras de 110 ml cada una, a las que se les agrego 5 gotas de fenolftaleína por igual. Dichas muestras se titularon con Hidróxido de Sodio (NaOH) al 1%. Los mililitros utilizados para cada muestra se promedian para calcular los gramos de catalizador a utilizar para un litro de aceite usado a procesar, de acuerdo a la formula (1).

$$\text{promedio de NaOH (ml)} + 3.5 = \text{catalizador requerido (gr)} \quad (1)$$

La acidez promedio que se obtuvo fue de 0.6, por lo que para cada litro de aceite usado de cocina a procesar se utilizaron 4.1 gr de catalizador, dicho catalizar fue el Hidróxido de Potasio (KOH). Puesto que de los catalizadores básicos homogéneos, el NaOH y el KOH (Túqueres, 2015), este presenta ciertas ventajas como lo son que la glicerina que queda del proceso es mucho menos tóxica que cuando se utiliza el NaOH (Abad *et al.*, 2014).

### Preparación de metoxido para transesterificación

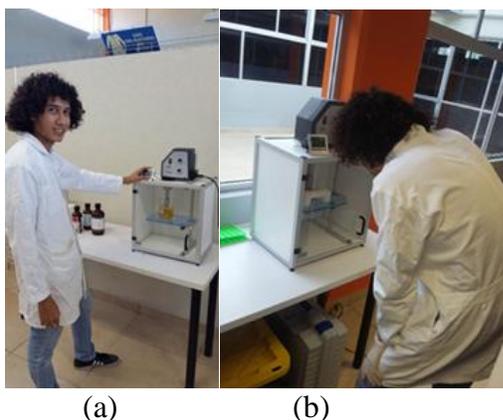
Se utiliza el 12% del volumen de aceite a procesar en metanol. El metanol y el etanol son los alcoholes comúnmente utilizados para la producción de biodiesel, otros alcoholes como propanol, isopropanol, butanol y pentanol pueden ser utilizados, pero estos son mucho más sensibles a la contaminación con agua, es decir, que la presencia de agua en mínimas cantidades impide la reacción (Túqueres, 2015).

Es por ello, que para este trabajo se utiliza el metanol como catalizador por ser el más reactivo. Se procesan un promedio de 4 litros de aceite de cocina usado, por lo que se utilizan 480 ml de metanol y 16.4 gr de KOH, los cuales se disuelven calentando a reflujo y agitación constante por 10 minutos para obtener el metoxido.

### Transesterificación en el Procesador Ultrasónico

Equipo que fue facilitado por el Consejo Tamaulipeco de Ciencia y Tecnología (COTACYT), a la Universidad Politécnica de Altamira (UPALT). La característica principal de este equipo son las vibraciones sónicas, las cuales desarrollan la integración y separación de las sustancias para la obtención de biodiesel. Sin embargo, al no contar con listado del punto óptimo, se llevo a cabo la experimentación para determinar dicho punto, con el fin de eficientar el proceso de transesterificación. (Figura 3a).

Para ello, se prepararon 60 muestras con 100 ml de aceite de cocina usado y 12 ml de metoxido cada una las cuales se calientan a 40 °C antes de introducirlas unas por una al procesador ultrasónico, las cuales se procesaron a 5, 10, 15 y 20 segundos en amplitudes del 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100% respectivamente y a un ciclo en todos los casos. Después de procesarse, cada muestra es vaciada a probetas de 100 ml, donde se dejan reposar por 24 horas. Se nota que la reacción de transesterificación no se completa, a amplitudes menores de 40% por lo que se procede a realizar desde la titulación hasta la preparación de muestras con otros 4 litros de aceite de cocina usado, los que procesa nuevamente pero en los rangos de 50 a 100% de amplitud en tiempos de 10 a 60 segundos, en intervalos de 10 en cada caso (Figura 3b).



**Figura 3** Procesador Ultrasonico, COTACYT –UPALT.

### Fase de lavado

Después de dejarlo reposar 24 horas se observa en las probetas dos capas, la glicerina abajo y el biodiesel arriba (Figura 4), las cuales son separadas y el biodiesel sometido a un lavado con agua destilada.



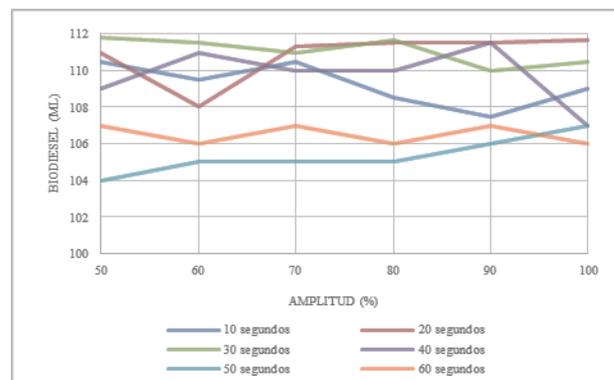
**Figura 4** Capas de biodiesel y glicerina.

### Análisis de Resultados

En la primera parte del proyecto, se nota que a bajas amplitudes y poco tiempo, la reacción de transesterificación no se completa, observando 3 capas en las muestras procesadas: aceite, biodiesel y glicerina. En la segunda parte, donde se procesa a mayores amplitudes y tiempos, todas las muestras completaron la reacción.

En el Grafico 1, se observa la relación de mililitros promedio en el rango de tiempo obtenidos de biodiesel con respecto a la amplitud en que se procesaron.

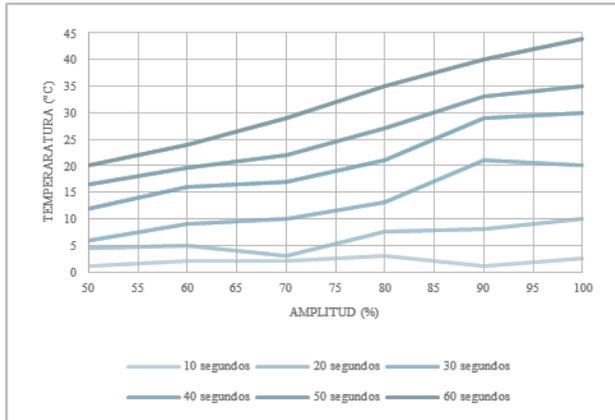
Se observa que a los tiempos de 20 y 30 segundos la producción de biodiesel es la máxima de los ensayos.



**Grafico 1** Biodiesel obtenido.

Sin embargo, se debe tomar en cuenta que en la transesterificación no solo se obtiene biodiesel, sino también glicerina; por lo tanto, contar con una cantidad inferior de glicerina después de la conversión nos puede significar una reacción inconclusa; además de que a 20 y 30 segundos se precalienta antes de procesar, caso que no ocurre a los 60 segundos, dado que aún con la amplitud más baja, la temperatura se eleva 20°C en este rango de tiempo (Grafico 2) y aumenta de manera proporcional conforme la amplitud se incrementa de manera proporcional conforme la amplitud se incrementa.

Teniendo en cuenta que la temperatura idónea para que se lleve a cabo la transesterificación es alrededor de los 64° C, por lo tanto se determina que en 60 segundos y 100% de amplitud son las variables más idóneas para procesar, por esta razón se disminuyó la temperatura a la que las muestras entraban al procesador, reduciendo así los tiempos y haciendo más eficiente el proceso.



**Gráfico 2** Medición de temperatura.

Aunque a 60 segundos no se obtuvo la mayor cantidad de biodiesel, es la más óptima, ya que como se observa de 10 a 40 segundos tenemos la mayor producción de biodiesel y a 50 segundos decae, sin embargo, a 60 segundos se incrementa nuevamente y como se había mencionado con anterioridad, el hecho de contar con una poca cantidad de glicerina después de la reacción de transesterificación no siempre nos refleja una buena reacción sino una reacción inconclusa.

Por lo tanto, una mayor cantidad de glicerina asegura que el triglicérido original se transformo paulatinamente en diglicérido, y monoglicérido, para formar el éster metílico de ácido graso conocido como biodiesel. Es así que se determina que 60 segundos, es el rango óptimo para la transformación de biodiesel de acuerdo a los ensayos realizados en este trabajo.

### Agradecimiento

Se agradece al COTACYT por el apoyo con el equipo *Procesador Ultrasonico*, material clave para la realización de esta investigación. De igual manera se agradece las atenciones y las facilidades prestadas en el Almacén y el Laboratorio de Energía Renovable a cargo de la Ing. Elida Liliana Ríos Vázquez.

### Conclusiones

En la presente investigación, se determinó en base a experimentación el punto óptimo en el proceso de obtención de un biocombustible en el equipo Procesador Ultrasonico. Se demostró que en el rango de 30 segundos, de 50 a 100% de amplitud y un ciclo, se obtuvo el 99% del volumen procesado, sin embargo, a 60 segundos con las mismas condiciones se obtuvo el 95% del volumen procesado, teniendo la ventaja de no precalentar la muestra antes de procesarlo, determinándolo como el punto óptimo puesto que al no precalentar, se gasta menos electricidad y esto fomenta la sustentabilidad del proceso además de estar utilizando un residuo como materia prima del biocombustible.

Se demuestra la necesidad de determinar las variables óptimas para eficientar el proceso de obtención de un biocombustible, en este caso la transesterificación para la obtención de biodiesel; el procesador ultrasónico es un equipo que facilita la obtención de biodiesel a partir del residuo. Se determinó, que a partir de los ensayos realizados, que a 60 segundos, 100% de amplitud y un ciclo es el punto óptimo, ya que del volumen procesado no más del 7% se transformó en glicerina y lo restante en biodiesel. Además se observó que durante el proceso de transesterificación en el procesador ultrasónico la temperatura se eleva, por lo cual ya no es necesario calentar previamente la mezcla aceite-metóxido antes de procesar, reduciendo el tiempo de procesamiento y aumentando la eficiencia del proceso de esta manera, ya que se está utilizando un residuo perjudicial al medio ambiente.

Es por ello, que el punto óptimo en el proceso utilizando el procesador ultrasónico minimiza el tiempo y gasto de consumibles para el procesamiento del residuo y la conversión del mismo, impulsando así de una manera sustentable la obtención del biocombustible.

## Referencias

- Abad Medina, E., Acosta Palacios, A., Burgos Arrascue, A., Cristantino Palacios, B., Eyzaguirre Yañez, J, Rivera Lopez, J. (2014). Analisis y Diseño de un Sistema de Recolección y Tratamiento de Aceites Domésticos Usados para la Producción de Biodiesel en la Ciudad de Piura y Castilla. Universidad de Piura. Ingeniería. Ingeniería Industrial y de Sistemas. Área Departamental de Ingeniería Industrial y de Sistemas. Proyectos. Piura, España, 104 pp. Dirección de internet: <http://pirhua.udep.edu.pe/handle/123456789/1713>
- Carta González J. A., Calero Pérez R.; Colmenar Santos A. y Castro Gil M. A. (2009). Centrales de Energías Renovables, Generación Eléctrica con Energías Renovables, Pearson, Prentice Hall, 728pp. Dirección de internet: <http://www.hielscher.com>
- Cortés, M. E., Mahecha, H. S., & Carrasco, S. P. (2009). Biocombustibles Y Autosuficiencia Energética Bio-Fuels And Energy Self-Sufficiency. *Dyna*, 76(158), 101-110.
- Franco M. (2013). Simulación del proceso de producción de biodiesel a partir de aceites vegetales en condiciones súper-criticas. Tesis de Maestría. Universidad de Politécnica de Cataluña. Barcelona, España, 79 pp.
- González, A., & Castañeda, Y. (2011). Biocombustibles, Estados Unidos, su estrategia hegemónica competitiva y la influencia en la política energética de México. *Sociedades Rurales*, 11(21).
- Hernández, M., & Hernández, J. (2008). Verdades y mitos de los biocombustibles. *Elementos*, 71, 15-18.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación, México, 28 de enero de 1988. Última reforma publicada DOF 07-06-2013.
- Ma, F. & Hanna, M. A. (1999). Biodiesel production: a review. *Bioresource technology*, vol. 70, no 1, p. 1-15.
- Meher, L. C., Sagar, D. V., & Naik, S. N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 10, No.3, 248-268pp.
- Mittelbach, M., Renschmidt, C. (2004) Biodiesel - The comprehensive handbook. 1st ed. Graz: Mittelbach, M. p.
- Moser, B. (2009) Biodiesel production, properties, and feedstocks. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant* 45 (3): p. 229-266.
- Santamaría, L. M. R., & Molano, M. Á. (2006). Trasesterificación del aceite de palma con metanol por medio de una catalisis heterogénea empleando un catalizador ácido (Doctoral dissertation, Uniandes).
- Túqueres Oña, R.C. (2015). Análisis de Viabilidad Técnica del Uso de Biodiesel en Centrales Termoeléctricas. Tesis de Licenciatura. Universidad Politécnica Salesiana. Quito, Ecuador, 118 pp.

Zeolite, Y. (2007). as a Heterogeneous Catalyst in Biodiesel Fuel Production from Used Vegetable Oil Brito, A.; Borges, ME. Otero, N. Energy & Fuels, 21(6), 3280-3283.

## Potencial de generación de biogás de un rancho ganadero en la comunidad de San Bartolo Cuautlalpan

ESPINAL-ARELLANO, Juan\*†, OLVERA-GARCÍA, Omar, HERNANDEZ-GÓMEZ, Víctor y MORILLÓN-GÁLVEZ, David.

*Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, Ciudad de México, CDMX, México*

Recibido Julio 18, 2016; Aceptado Septiembre 23, 2016

### Resumen

El artículo describe la metodología y los resultados obtenidos a partir de pruebas experimentales de producción de biogás a partir de las excretas del ganado de un rancho ubicado en San Bartolo Cuautlalpan, municipio de Zumpango. Se incluye la puesta en marcha de los biodigestores, una descripción de la instrumentación empleada en la toma de los datos, los resultados obtenidos en las pruebas experimentales realizadas con desechos orgánicos de ganado bovino y porcino, en diferentes relaciones de materia orgánica – agua, durante el periodo comprendido entre marzo y agosto de 2016 y la estimación de la producción total de biogás y metano que se puede obtener con los desechos de los animales del rancho con su equivalente en kWh.

### Abstract

The article describes the methodology and results obtained from experimental tests of biogas production from livestock excreta from a ranch located in San Bartolo Cuautlalpan, municipality of Zumpango. the implementation of biodigesters, a description of the instrumentation used in making data, the results obtained in the experimental tests with organic waste from cattle and pigs in different ratios of organic matter is included - water for the period between March and August 2016 and the estimated total production of biogas and methane that can be obtained with animal waste ranch with its equivalent in KWH.

**Organic matter, digester, biogas and methane**

### Materia orgánica, biodigestor, biogás y metano

**Citación:** ESPINAL-ARELLANO, Juan, OLVERA-GARCÍA, Omar, HERNANDEZ-GÓMEZ, Víctor y MORILLÓN-GÁLVEZ, David. Potencial de generación de biogás de un rancho ganadero en la comunidad de San Bartolo Cuautlalpan. Revista de Sistemas Experimentales 2016, 3-8: 36-52

\*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: vichugo@unam.mx)

†Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Los ranchos dedicados a la ganadería y a la siembra, emplean los desechos orgánicos del ganado como abono para sus tierras, esto lo hacen depositando dicha materia orgánica directamente sobre la tierra, lo que ocasiona que el viento arrastre parte de esos desechos y emita mal olor en las zonas cercanas. Al ser un rancho ganadero, la producción de desechos orgánicos es más alta de la que se puede emplear como abono, por lo cual, la mayoría lo almacena a cielo abierto hasta su utilización generando también problemas de contaminación al medio ambiente. Esta problemática lleva a la necesidad de buscar alternativas para su correcto manejo y también para su aprovechamiento, los biodigestores son dispositivos que pueden solventar esta problemática, dado que además de recuperar el biogás obtenido por la descomposición de la materia orgánica, el residuo resultante sirve como un excelente fertilizante. El biogás que se produce está compuesto por una mezcla de gases tales como metano, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, hidrógeno y nitrógeno. Sin embargo, el metano representa entre un 50 – 60% del biogás, mientras el dióxido de carbono equivale a un 30 – 40%, de la mezcla. Según el análisis sectorial de desechos sólidos en la Zona Metropolitana del Valle de México, aproximadamente el 53% de los desechos generados pueden emplearse para la producción de biogás en México y la SEDESOL reporta 25,000 ton/día que se depositan en tiraderos a cielo abierto, barrancas o bien, en cualquier otro sitio sin control (incluye sitios clandestinos).

En la comunidad de San Bartolo Cuautlalpan, Zumpango, Estado de México, se encuentra ubicado el rancho Los dos hermanos, esta propiedad se dedica principalmente a la siembra de maíz y obtiene ingresos adicionales a través de la compra, cría y venta de ganado bovino y porcino.

En el rancho Los dos hermanos también se crían ganado ovino y cunícola, así como aves para autoconsumo.

La demanda de energía eléctrica del rancho es abastecido a través de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y es utilizada para realizar actividades como la preparación de alimentos y el alumbrado, ya que las labores de ganadería y agricultura se realizan de manera manual y con ayuda de un tractor, de modo que la demanda eléctrica del rancho es de aproximadamente 80 kWh bimestrales.

Este proyecto consiste en analizar la factibilidad de emplear los desechos orgánicos del rancho, para generar la energía eléctrica requerida para la preparación de alimentos e iluminación del mismo, y abonar sus cultivos con el abono generado por el biodigestor, lo cual provocaría un ahorro en la facturación energética y la reducción de la contaminación ambiental del lugar. Para ello se le solicitó al Laboratorio de Investigación en Energías Renovables (LIER) de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, que realizara el estudio correspondiente, ya que cuenta con 12 biodigestores del tipo discontinuo, con capacidad de 33 litros cada uno, para llevar a cabo pruebas simultáneas con diferentes sustratos.

## Antecedentes

En la actualidad se han realizado estudios para observar el comportamiento de la generación de biogás bajo distintas características como:

Amarely Santana y B. Pound [1] observaron que la variación en la alimentación de dos novillos (hierba/melaza o caña de azúcar picada) puede influenciar en la generación de metano.

Encontraron que la dieta a base de melaza/hierba produce mayor cantidad de metano y sugieren que esto es debido a que se tiene una mayor relación carbono - nitrógeno que la dieta a base de caña de azúcar.

San Thy y et al [2] observaron la producción de biogás, mediante la descomposición de materia fecal de cerdo, con tiempos de retención de 10, 20 o 30 días en biodigestores continuos de 510 litros. En el primer experimento, la cantidad de materia fecal fue de 5.1 kg/día, mezclado con 46, 20 o 12 litros de agua con tiempos de retención de 10, 20 o 30 días respectivamente. En un segundo experimento las proporciones de materia fecal y agua se mantuvieron constantes para dar un contenido de sólidos totales de 60 g/litro. Obtuvieron una producción de 1.04, 1.20 y 1.12 m<sup>3</sup> de biogás por un m<sup>3</sup> de efluente y que el tiempo de retención óptimo está entre 10 y 20 días.

Chae y et al [3] observaron el comportamiento de la generación de biogás al variar la temperatura del estiércol de cerdo en el proceso de degradación. Tomaron valores de 25 °C, 30 °C y 35 °C con cuatro cargas de alimentación al 5 %, 10 %, 20 % y 40 %. Observaron una reducción en la concentración de metano del 3% entre el de la temperatura de 35 °C y la de 30 °C y una diferencia del 17.4 % entre la de 35 °C y el de 25 °C. Obtuvieron valores de 327, 389 y 403 ml de CH<sub>4</sub>/g de sustrato respectivamente.

Stephanie y et al [4] al estudiar siete biodigestores de bajo costo en Costa Rica empleando como sustrato al agua residual de los animales, encontraron que se podía obtener biogás con una concentración del 66% de metano mejorando la calidad de las aguas residuales para ganado.

Atem y et al [5] llenó 20 biodigestores discontinuos de PET con capacidad de 4 litros con residuos de tomate de la industria local y fluido ruminal como inóculo. Después de mantener la temperatura constante durante 118 días inició la medición del biogás generado durante otros 34 días obteniendo 0.10 m<sup>3</sup> de biogás por kg con un 50% de metano.

Ivet Ferrer y et al [6] estudiaron la producción de biogás en digestores domésticos ubicados a gran altura, operando bajo condiciones psicofílicas. Utilizaron un volumen útil de estiércol de vaca entre 2.4 m<sup>3</sup> y 7.5 m<sup>3</sup> en pruebas de 60 y 90 días. Obtuvieron temperaturas entre 20°C y 25°C y una producción de 0.35 m<sup>3</sup> por kg, con una concentración del 65% de CH<sub>4</sub>.

Sung-Mok y et al [7] encontraron que se incrementaba la generación de biogás, a partir de la fermentación de Laminaria japónica, al emplear un cultivo mixto de Clostridium butyricum y Erwinia tasmaniensis, llegando a tener niveles de hidrógeno y metano de 327,47% y 354,99% respectivamente.

M.S. Ak y et al [8] realizaron un estudio en el cual duplicaron la producción de biogás que se genera por la degradación del lodo activado producido durante el tratamiento biológico de residuos líquidos y sólidos, empleando al ozono (1.33 mg O<sub>3</sub>/g).

González y et al [9] realizaron un estudio para determinar la capacidad de una planta de generación de energía eléctrica empleando metano generado por la degradación de residuos de cerdo y una planta fotovoltaica. Realizaron experimentos con tres biodigestores continuos alimentándolos con 150, 200 y 250 ml de sustrato al día, durante 40, 30 y 24 días respectivamente. Encontraron una producción máxima de 22.53 m<sup>3</sup> de biogás por un m<sup>3</sup> de sustrato, con un contenido de metano del 75%.

Iván Vera y et al [10] estimaron la cantidad de biogás obtenible a partir de las excretas de ganado bovino y porcino de la región de Ciénega de Chapala, Michoacán.

Basándose en censos del INEGI y valores promedio calcularon la cantidad total de estiércol y de biogás obtenibles, así como la energía eléctrica generable a partir de la misma. Los resultados suponen un ahorro de energía eléctrica del 4.3%, equivalente para 2013 a \$MX 18,300,000 tomando como base un costo de \$MX 2.236/kWh.

Iván Vera y et al [11] estimaron la cantidad de biogás obtenible a partir de la descomposición anaeróbica de residuos sólidos urbanos que permita generar energía eléctrica para la región de Ciénega de Chapala, Michoacán.

Jesús R. González y Luis R. González [12] realizaron pruebas de producción de biogás con diversos sustratos, cuyos resultados resaltan que los desechos orgánicos del conejo alcanzan concentraciones de metano superiores al 70%, en tanto que la poda de pasto y desechos de comida la producción fue mínima. Adicionalmente, los investigadores señalan que los desechos de conejo lograron producir 0.708 litros de biogás por cada kilogramo de excremento, en tanto que los desechos de vaca alcanzaron una producción de 0.26 L/kg, con porcentajes de metano similares a los alcanzados por el biogás producido por los desechos cunícolas.

Peyman Abdesahian y et al [13] determinaron que en el año 2012 el potencial de generación de biogás a partir de estiércol, sangre y contenido de rumen obtenidos de granjas y mataderos de Malasia era de 4589.49 millones de metros cúbicos por año, con lo cual se podría generar 8.27 X 10<sup>9</sup> kWh por año.

Basak K. Taseli y Birol Kilkis [14] propusieron dos escenarios (uno de ellos con tres niveles) para generar energía eléctrica y reducir las desventajas ambientales de un hospital universitario con 900 camas. Con la intención de obtener suficiente biogás se propuso emplear los desechos del hospital y crear un establo para 6000 cabezas de ganado lechero; lo cual permitiría que los alumnos del departamento de agricultura cuenten con una granja didáctica. El escenario base contempla tres máquinas para trigeneración cuya capacidad combinada sería de 5.65 MW.

E. Chan y et al [15] realizaron una investigación cuyos resultados indican que el biogás producido a partir del estiércol líquido de cerdo en México tiene potencial para producir 21 X 10<sup>15</sup> Joules anualmente. Se agregó pasto elefante (*pennisetum purpureum*) para mejorar el rendimiento de las excretas de cerdo. Los investigadores sostienen que el precio de la energía eléctrica generada in – situ sería de \$US 0.129/kWh.

W. Uddin y et al [16] estimaron que el estiércol ganadero de Pakistán puede producir 35.625 millones de kWh diarios, con lo cual se podría superar la crisis energética de dicho país, en el cual la indisponibilidad de energía eléctrica puede durar entre 14 y 20 horas al día. El Consejo Pakistání de Tecnologías Renovables, PCRET por sus siglas en inglés (Pakistan Council of Renewable Technologies), ya ha instalado 4109 plantas de biogás a lo largo del país, con lo cual se logran ahorros mensuales promedio de 37.925 millones de rupias pakistaníes en términos de queroseno, madera, gas l.p. y biofertilizante.

M. Ríos y M. Kaltschmitt [17] sugieren que México tiene un potencial considerable para usar biogás de desechos orgánicos como una fuente renovable para generar electricidad.

Los resultados de su investigación muestran un potencial teórico promedio de 167.9 TWh/año, un potencial técnico promedio de 10.2 TWh/año y un potencial económico promedio de 6.4 TWh/año.

Bundhoo y et al [18] realizaron una investigación para determinar el potencial energético de la República de Mauricio a partir de la descomposición anaeróbica de biomasa y distintos desechos disponibles en la ya mencionada isla. Sus resultados indican que la energía neta disponible alcanza los 4685 TJ/año, de los cuales 2174 TJ/año corresponden a energía eléctrica y 2511 TJ/año a energía térmica, representando 12.6% del consumo energético final de la República de Mauricio. Los residuos de la caña de azúcar (3790 TJ/año) son la principal fuente de biogás a larga escala disponibles en dicho país.

Piowar y et al [19] llevaron a cabo una investigación para mostrar el desarrollo actual del mercado de biogás agrícola en Polonia, en la cual indican que de 2011 a 2014, la producción de biogás aumentó 127.39 millones de metros cúbicos. Debido a la gran área de suelo agrícola, la relativamente alta población de ganado bovino y porcino y a la bien desarrollada industria alimenticia de Polonia, su mayor fuente de energía renovable es la biomasa agrícola. Actualmente, la capacidad total de las plantas de biogás en Polonia es 244,156,466 m<sup>3</sup>/año.

Silva dos Santos y et al [20] presentaron un método para analizar la viabilidad económica y energética de la generación de energía mediante biogás producido en plantas anaeróbicas de tratamiento de aguas residuales y desechos sólidos municipales en Brasil.

Los resultados indicaron viabilidad económica únicamente para ciudades cuya población supere los 300,000 habitantes y que el potencial energético pueda suministrar alrededor del 0.25% de los residuos fósiles, de acuerdo con el Ministerio Brasileño de Ciencia y Tecnología. Este potencial energético representa toda la energía que pueda ser producida a partir de desechos en Brasil para 2020.

A. Ware y N. Power [21] evaluaron el potencial de recuperación de energía de los subproductos orgánicos de un matadero de ganado bovino en Irlanda. Se analizó el potencial de producción de metano de distintos fluidos, así como el de la mezcla de ellos y se determinó que es viable combinar los desechos, ya que el rendimiento de metano no disminuye. Adicionalmente, la mezcla de desechos tiene potencial de recuperación de energía suficiente para subsidiar al 100% la demanda energética del matadero.

E. U. Khan y A. R. Martin [22] evaluaron el estatus actual de la tecnología de biodigestores en áreas rurales de Bangladesh, la cual abarca 75% de la población. Debido a la falta de conocimiento técnico, los altos costos de instalación y operación, disponibilidad de materia prima y las limitadas aplicaciones finales, sólo se obtiene el 1% del potencial total de biogás, estimado en 14.5 millones de m<sup>3</sup>/año.

### Análisis de antecedentes

La generación de electricidad a partir de biogás es considerado alrededor del mundo como una solución para satisfacer las necesidades energéticas, así como para generar electricidad limpia, ya que el uso del biogás como combustible no da lugar a la liberación de dióxido de carbono a la atmósfera.

Los países con economías emergentes poseen una gran cantidad de desechos orgánicos procedentes de distintas fuentes, sin embargo, no cuentan con la infraestructura necesaria para explotar al máximo su potencial energético, en gran medida debido a que los proyectos de esta índole suelen ser planeados a gran escala y a que los estudios realizados contemplan regiones considerablemente extensas o sumamente pobladas. No obstante, se debe tomar en cuenta que en muchas ocasiones los desechos orgánicos no se encuentran distribuidos uniformemente a lo largo y ancho de las áreas consideradas, lo cual dificulta las labores de recolección y tratamiento de los desechos y puede causar la exclusión de cierta cantidad de materia prima. Si bien los estudios realizados a gran escala muestran resultados alentadores, los pequeños proyectos para aprovechar el biogás y generar electricidad con él no han sido contemplados como una alternativa para el autoabasto energético.

### Procedimiento experimental

El proyecto contempló el empleo de los biodigestores del LIER, por lo cual se les dio mantenimiento para verificar el correcto funcionamiento de los termopares, el de las válvulas de extracción del biogás y el sellado de los biodigestores.

Con el fin de determinar el rango adecuado de dilución para las mezclas del sustrato, se realizaron pruebas de masa seca y masa volátil de los excrementos de vaca y cerdo. Para ello se utilizó la metodología descrita por Jesús González y Luis González [12], la cual consiste en hornear las muestras de excremento durante 48 horas a 105 °C para hallar la masa seca, y posteriormente incinerar tales muestras durante 6 horas a 550 °C para obtener la masa volátil. En la figura 1 se ilustra el proceso de obtención de masa seca y masa volátil.



**Figura 1** Materia orgánica antes y después del proceso.

La masa seca corresponde a la materia libre de humedad que compone el excremento, y se calcula empleando la ecuación (1):

$$m_s = \left[ 1 - \frac{m_h - m_d}{m_h} \right] \times 100\% \quad (1)$$

Donde:

$m_s$  = masa seca, g.

$m_h$  = masa hidratada, g.

$m_d$  = masa deshidratada, g.

La masa volátil es el porcentaje de materia orgánica presente en la biomasa, e indica qué fracción de la misma ha de producir biogás, de modo que un porcentaje alto es deseable. La ecuación (2) permite calcular la masa volátil.

$$m_v = \left[ \frac{m_d - m_i}{m_d} \right] \times 100\% \quad (2)$$

Donde:

$m_v$  = masa volátil, g.

$m_d$  = masa deshidratada, g.

$m_i$  = masa incinerada, g.

Tras determinar las concentraciones de los sustratos, se vació el agua y materia orgánica en cada biodigestor, revolviendo ambas partes hasta incorporarse homogéneamente. Tras culminar dicha fase se sellaron correctamente los biodigestores y se verificó la ausencia de fugas. En la figura 2 se aprecia el sustrato formado por agua y excremento de vaca dentro del biodigestor durante el llenado del mismo.



**Figura 2** Sustrato formado por agua y excremento de vaca.

Durante las primeras 15 semanas de la fase experimental, se midió diariamente la presión de biogás generado y la temperatura del sustrato, mientras que el porcentaje de metano presente en el biogás y el pH del sustrato se cuantificaron semanalmente. Las primeras mediciones de porcentaje de metano en el biogás se realizaron entre las semanas 3 y 4, a partir de las cuales se tuvo suficiente biogás para realizar la prueba correspondiente.

Tras las 15 primeras semanas del experimento, la presión del biogás y la temperatura dentro del biodigestor se midieron cada tercer día, en tanto que los otros parámetros se midieron normalmente.

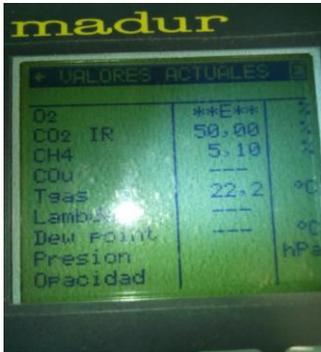
La medición de la temperatura del sustrato se realizó con ayuda de un termómetro digital conectado a un termopar que forma parte de la tapa del biodigestor y cuyo extremo está en contacto con la mezcla de agua y materia orgánica. Por su parte, la presión dentro de los biodigestores se midió empleando un manómetro conectado a la válvula superior de los biodigestores. Debido a que los biodigestores tienen una resistencia máxima a presiones internas de 7 psi y no cuentan con válvulas de alivio de presión, siempre que la presión interna de un biodigestor sobrepasó los 6 psi se quemó cierta cantidad de biogás, de modo que se eliminara el riesgo de una explosión por exceso de presión. La figura 3 muestra la quema del biogás excedente.



**Figura 3** Quema de biogás excedente.

La medición del pH se realizó mediante la utilización de tiras reactivas, las cuales cambian de color tras sumergirse dentro del sustrato, permitiendo así su cotejo con una carta comparativa que indica el pH de la sustancia analizada.

Para obtener una muestra del sustrato dentro del biodigestor se abrió la válvula inferior del biodigestor y se permitió la salida de una cantidad mínima de la mezcla. Para cuantificar el metano presente en el biogás se empleó un analizador de gases Madur Ga-21 plus, cuya pantalla se presenta en la figura 4. Durante la totalidad del experimento se verificó regularmente la ausencia de fugas de biogás.



**Figura 4** Pantalla del analizador de gases durante una medición de componentes del biogás.

Para cuantificar el biogás producido dentro de cada biodigestor se empleó el método desarrollado por Jesús R. González y Luis R. González [12], el cual consistente en relacionar variables tales como la presión acumulada de biogás dentro de cada biodigestor durante cierto periodo, así como el porcentaje de metano alcanzado en el mismo lapso, para así determinar la masa de biogás contenida dentro de cada biodigestor y posteriormente hallar los litros de biogás producidos semanalmente.

Tras cuantificar la presión acumulativa semanal y su respectivo porcentaje de metano, el siguiente paso del desarrollo experimental, consiste en determinar la masa molar del biogás, la cual equivale a la suma de la masa molar de cada compuesto que lo integra. Sin embargo, debido a que los principales componentes del biogás son metano y dióxido de carbono, en los cálculos siguientes se contemplará que la suma de la masa molar de dichos compuestos equivale a la totalidad de la masa molar del biogás, lo cual se expresa mediante la ecuación (3):

$$M = M_{CH_4} + M_{CO_2} \quad (3)$$

Donde:

$M$  = masa molar del biogás, kg/mol

$M_{CH_4}$  = masa molar del metano, kg/mol

$M_{CO_2}$  = masa molar del dióxido de carbono, kg/mol

Dado que la masa molar del metano y dióxido de carbono son 0.01604 kg/mol y 0.04401 kg/mol, respectivamente, la masa molar de tales compuestos para una concentración particular está dada por las ecuaciones (4) y (5):

$$M_{CH_4} = 0.01604 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \times \%CH_4 \quad (4)$$

$$M_{CO_2} = 0.04401 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \times \%CO_2 \quad (5)$$

Donde:

$0.01604 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$  = peso molecular del metano, kg/mol

$\%CH_4$  = porcentaje de metano presente en la muestra, %

$0.04401 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$  = peso molecular del dióxido de carbono, kg/mol

$\%CO_2$  = porcentaje de metano presente en la muestra, %

## Resultados y análisis

Con los resultados obtenidos se determinaron tanto la masa seca como la masa volátil, y considerando dichas variables se crearon dos diluciones distintas para excrementos de vaca y tres para desechos de cerdo. Los resultados de las pruebas de masa seca y volátil se presentan en la tabla 1 y los sustratos empleados durante las pruebas experimentales se señalan en la tabla 2.

| Tipo de desecho     | Masa hidratada [g] | Masa deshidratada [g] | Masa incinerada [g] | Masa seca [%] | Masa volátil [%] |
|---------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|---------------|------------------|
| Excremento de cerdo | 144.2              | 32.4                  | 3.1                 | 22.47         | 90.43            |
| Excremento de vaca  | 283                | 42.8                  | 12.5                | 15.12         | 70.79            |

Tabla 1 Resultados de las pruebas de masa seca y volátil.

| Biodigestor no. | Tipo de desecho     | Porcentaje de materia [%] | Porcentaje de agua [%] |
|-----------------|---------------------|---------------------------|------------------------|
| 1               | Excremento de cerdo | 50                        | 50                     |
| 2               | Excremento de cerdo | 66.67                     | 33.33                  |
| 3               | Excremento de cerdo | 33.33                     | 66.67                  |
| 4               | Excremento de vaca  | 50                        | 50                     |
| 5               | Excremento de vaca  | 25                        | 75                     |

Tabla 2 Mezclas de los sustratos empleados durante las pruebas experimentales.

La figura 5 muestra la gráfica comparativa de las presiones acumuladas por semana de las muestras más representativas de biogás producido por vaca y cerdo.

## Producción semanal de biogás

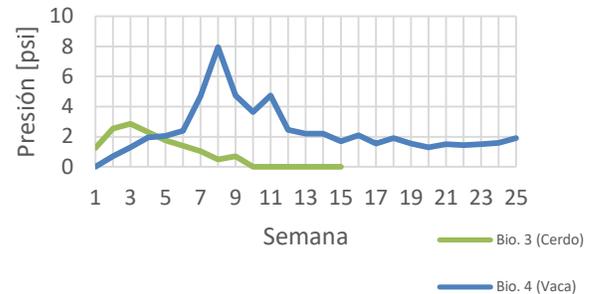


Figura 5 Presiones acumuladas por semana.

Se puede apreciar que durante las primeras cuatro semanas las excretas de cerdo produjeron una cantidad mayor de biogás que las excretas de vaca, sin embargo, estas últimas

Produjeron una cantidad mucho mayor durante las semanas posteriores, e incluso durante más tiempo. Cabe mencionar que las excretas de cerdo sólo produjeron biogás durante 10 semanas, alcanzando su mayor producción en la tercera semana, mientras que las excretas de vaca alcanzaron su mayor producción de biogás en la semana 8 y al momento de la captura de datos para el presente artículo (semana 25) aún no finalizaba su producción.

La posible causa de la gran diferencia en la duración de la producción de biogás de ambas muestras es la solubilidad de las excretas, pues mientras los desechos ovinos formaron una mezcla con escasa presencia de partículas no disueltas, los desechos porcinos continuaron presentando una elevada cantidad de gránulos tras mezclarse con agua, los cuales se sedimentaron al fondo del biodigestor. Esta situación podría haber causado que una gran parte de la materia no se degradara o lo hiciera de manera sumamente lenta.

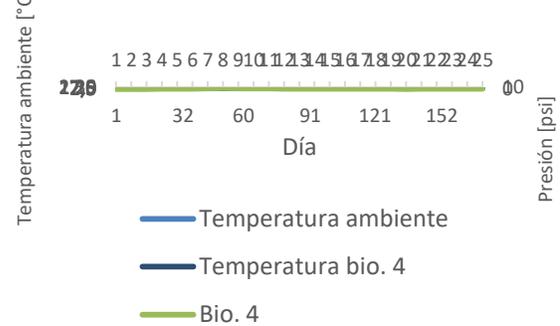
La figura 6 presenta el sustrato del biodigestor 3 antes y después de vaciarlo tras finalizar su producción de biogás, el cual contenía una mezcla compuesta por 33.33% de excremento de cerdo y 66.66% de agua. Además de la espuma presente en la superficie de la mezcla, se puede apreciar que ningún gránulo es visible en la misma.



**Figura 6** Sustrato del biodigestor 3.

En la figura 5 también se puede observar que durante las semanas 9 y 10, la producción de biogás en el biodigestor 4 disminuyó drásticamente, sin embargo, en la semana 11 volvió a incrementarse, lo anterior podría ser atribuible a las variaciones de temperatura que tuvieron lugar durante dicho periodo y que se muestran en la figura 7.

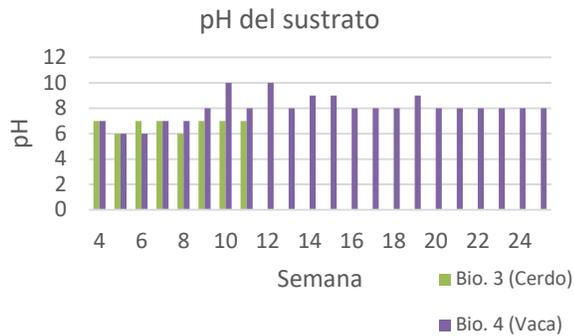
Efecto de la temperatura en la producción de biogás  
Semana



**Figura 7** Efecto de la temperatura en la producción de biogás.

Se observa que al principio de la semana 8 hubo una disminución en la temperatura ambiental de alrededor de 3.5 °C en dos días, mientras que la temperatura del sustrato disminuyó 4 °C en el mismo periodo. Estos cambios en la temperatura se pueden considerar drásticos, si se toma en cuenta que regularmente la temperatura cambia 1.8 °C en lapsos de tiempo similares. Vale la pena mencionar que en semanas como la 16, 18, 21 y 24 se aprecian un ligero aumento en la producción de biogás con respecto a las semanas inmediatas anteriores, dichos fenómenos coinciden en tiempo con incrementos en la temperatura ambiente e interna del biodigestor.

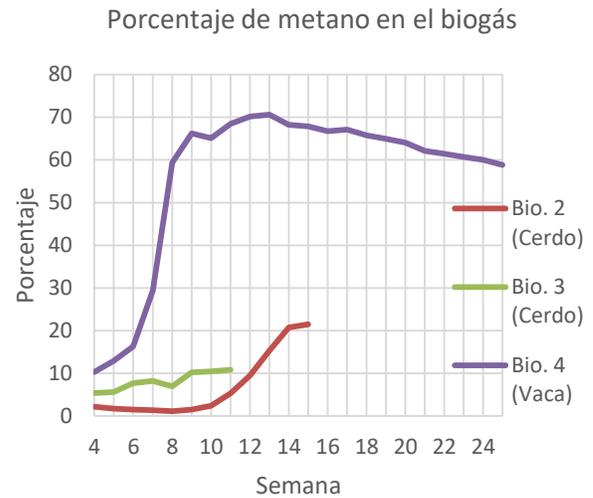
El pH del sustrato se midió semanalmente y cuyos resultados para los biodigestores 3 y 4 se ilustran en la figura 8.



**Figura 8** pH de los sustratos.

El pH del sustrato de excretas de cerdo y agua fue predominantemente neutro, aunque con cierta tendencia a ser ácido, ya que en la escala del pH un valor de 7 corresponde a una sustancia neutra, valores mayores a 7 indican pH alcalinos y menores de 7 revelan que la sustancia analizada es ácida. Por su parte, el pH del sustrato de excretas de vaca y agua es predominantemente alcalino, ya que desde la semana 9 y hasta la 25 se encontró con valores mayores a 7, obteniendo en dos ocasiones un pH de 10 y en tres ocasiones su pH fue 9.

De las 22 mediciones, sólo tres arrojaron un pH de 7 y tan sólo dos veces, en las semanas cinco y seis, el pH fue de 6. Estos resultados sugieren que el pH no fue un factor decisivo en la cantidad de biogás producido, pues en las semanas 11 y 12 se tuvo el pH más alcalino, pero la cantidad de biogás producido no fue el mayor. En cuanto a la calidad del biogás, es deseable que este cuente con el mayor porcentaje de metano posible, pues tal componente es el encargado de arder durante la quema del biogás. La figura 9 muestra el porcentaje de metano presente en el biogás de los biodigestores 1, 3 y 4 medido semanalmente.



**Figura 9** Porcentaje de metano presente en el biogás.

Como se observa, las excretas de vaca producen un porcentaje mayor de metano que las excretas de cerdo, cuyo biogás apenas alcanzó el 21.49% de contenido de metano en el mejor de los casos. Cabe mencionar que en el caso del biodigestor dos, el porcentaje de metano mantuvo una tendencia a la alza durante 6 de las 7 semanas en las que se monitoreó dicho parámetro, mientras que el biogás del biodigestor tres presentó un porcentaje de metano relativamente constante hasta la semana 9. En contraste, la muestra más representativa del biogás producido por excretas de vaca alcanzó su mayor porcentaje de carbono en la semana 13, obteniendo 70.58% de metano. A partir de ese momento el porcentaje de metano se redujo gradualmente en aproximadamente 0.8% cada semana.

Para determinar la cantidad de biogás generado, como un ejemplo del cálculo se tomarán como base los datos recopilados para el biodigestor 4 durante la semana 13, la cual abarca del 20 al 27 de mayo de 2016, cuyo porcentaje de metano es 70.58%, la presión acumulada es 2.2 psi y la temperatura es 23.5 °C. Las masas molares del metano, dióxido de carbono y biogás producido esa semana serán:

$$M_{CH_4} = 0.01604 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \times 0.7058 = 0.01132 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$M_{CO_2} = 0.04401 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \times 0.29420 =$$

$$0.01295 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$M = 0.01132 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} + 0.01295 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$M = 0.02427 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

A continuación, la masa molar del biogás se utiliza en la ecuación (6) para calcular la constante particular del biogás de la semana 13, sabiendo que la constante universal de los gases es  $R_u = 8.314 \text{ Nm/mol} \cdot \text{K}$ .

$$R_p = \frac{R_u}{M} \quad (6)$$

Donde:

$R_p$  = constante particular del biogás, Nm/kgK

$R_u$  = constante universal de los gases, Nm/molK

Por lo tanto, la constante particular del biogás es:

$$R_p = \frac{8.314 \text{ Nm/mol} \cdot \text{K}}{0.02427 \text{ kg/mol}}$$

$$R_p = 342.56283 \text{ Nm/kg} \cdot \text{K}$$

A continuación se determinó la densidad del biogás contenido dentro del biodigestor con ayuda de la ecuación (7) de los gases ideales:

$$PV = mR_p T \quad (7)$$

Donde:

$P$  = presión absoluta del gas, Pa

$V$  = volumen del gas,  $\text{m}^3$

$m$  = masa del gas, kg

$R_p$  = constante particular del gas, Nm/kg · K

$T$  = temperatura, K

Despejando de (7) se obtiene la ecuación (8) para determinar la densidad del gas:

$$\frac{m}{V} = \frac{P}{R_p T} \quad (8)$$

Antes de proceder a calcular la densidad del biogás es necesario realizar las conversiones de presión manométrica en psi a absoluta en Pa y de temperatura en °C a °K.

$$P = 2.2 \text{ psi} \times \frac{6894.76 \text{ Pa}}{1 \text{ psi}} + 101.325 \text{ Pa}$$

$$P = 15269.797 \text{ Pa}$$

$$T = 23.5 \text{ }^\circ\text{C} + 273.15 = 296.65 \text{ K}$$

$$\frac{m}{V} = \frac{15269.797 \text{ Pa}}{(342.56283 \frac{\text{Nm}}{\text{kg} \cdot \text{K}}) (296.65 \text{ K})}$$

$$\frac{m}{V} = 0.15026 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\frac{m}{V} = 0.15026 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Para calcular la masa del biogás basta con emplear la ecuación (9), tomando en cuenta que el volumen ocupado por el biogás es 23 L, ya que el volumen total del biodigestor es de 33 L y la mezcla ocupa 10 L.

$$m = V \cdot \rho \quad (9)$$

Donde:

$\rho$  = densidad,  $\text{kg/m}^3$

$$m = 23 \text{ L} \times 0.15026 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}$$

$$m = 3.45602 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

El último paso para conocer la cantidad de litros de biogás generados consiste en emplear una variante de la ecuación (9), que será denominada (10) y que contempla la densidad del biogás a presión atmosférica como  $1.25 \text{ kg/m}^3$ :

$$V = \frac{m}{\rho} \tag{10}$$

$$V = \frac{3.45602 \times 10^{-3} \text{ kg}}{1.25 \text{ kg/m}^3}$$

$$= 4.17073 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V = 2.76482 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}$$

Por lo tanto, en la semana 13 el sustrato de excretas de vaca al 50% y agua al 50% produjo:

$$V = 2.76482 \text{ L}$$

El método de cuantificación de biogás de Jesús R. González y Luis R. González se aplicó para el resto de semanas y biodigestores, a modo de obtener la producción de biogás de cada semana. En la figura 10 se muestran los litros de biogás producidos cada semana por los biodigestores 1, 3 y 4.

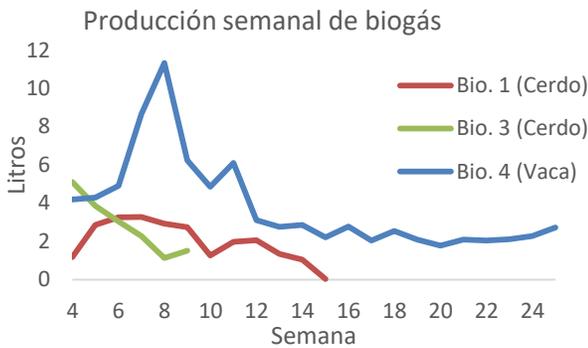


Figura 10 Litros de biogás producido.

Se observa que el sustrato del biodigestor 1 nunca superó los 3.5 litros producidos de biogás, en tanto que el sustrato correspondiente al biodigestor 3 tuvo una producción máxima de 5 litros por semana, aunque sólo ocurrió una ocasión y posteriormente su producción decreció drásticamente, en tanto que el sustrato del biodigestor 4 alcanzó una producción máxima de 11.3 litros por semana.

No fue posible cuantificar el biogás producido durante las tres primeras semanas, ya que las mediciones de porcentaje de biogás comenzaron hasta la cuarta semana de experimentación. En la figura 11 se presenta el total de litros de biogás producidos por los cinco sustratos evaluados.

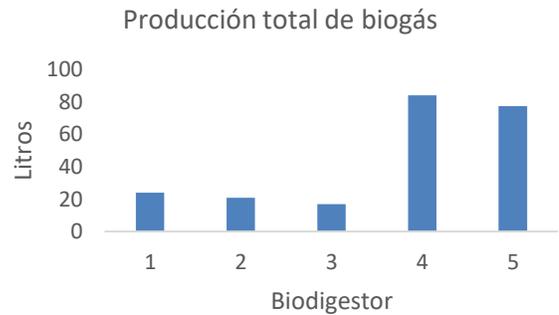


Figura 11 Producción total de biogás.

Es necesario discernir entre litros de biogás y litros de metano. El primer término hace referencia a los litros obtenidos de la mezcla de gases que conforman el biogás, en tanto que el segundo concepto se refiere únicamente a la parte aprovechable del biogás en forma de energía. La figura 12 ilustra lo antes comentado.

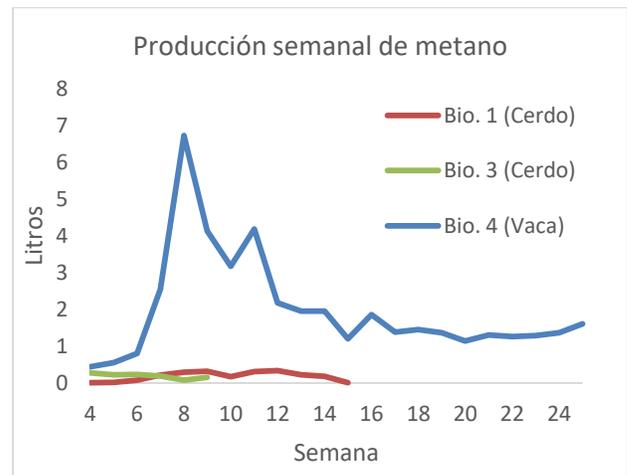


Figura 12 Litros de metano producido.

Se observa que los sustratos de excremento de cerdo y agua no produjeron una cantidad considerable de metano, posiblemente debido a los mismos factores que causaron las bajas presiones acumuladas representadas en la figura 7. En la tabla 3 se presenta la producción total de metano para cada sustrato analizado, así como el porcentaje máximo de metano alcanzado y en la tabla 4 se presenta la densidad del estiércol de vaca y cerdo empleados en la mezcla de los sustratos.

| Biodigestor no. | Animal productor de excretas | % de excretas | % de agua | Metano producido [L] | % máximo de metano |
|-----------------|------------------------------|---------------|-----------|----------------------|--------------------|
| 1               | Cerdo                        | 50            | 50        | 2.1375               | 17.23              |
| 2               | Cerdo                        | 66.67         | 33.33     | 0.8165               | 21.49              |
| 3               | Cerdo                        | 33.33         | 66.67     | 1.1486               | 10.86              |
| 4               | Vaca                         | 50            | 50        | 43.8043              | 70.58              |
| 5               | Vaca                         | 25            | 75        | 36.6201              | 64.94              |

**Tabla 3** Producción total de metano.

| Animal productor de excretas | Masa de la excreta analizada [kg] | Volumen de la excreta analizada [m <sup>3</sup> ] | Densidad de la excreta analizada [kg/m <sup>3</sup> ] |
|------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| Cerdo                        | 0.1442                            | 0.000155  | 930.3226  |
| Vaca                         | 0.283                             | 0.0002972   | 952.2207  |

**Tabla 4** Densidad de las excretas.

Conociendo la densidad de las excretas y el volumen empleado en la preparación de cada sustrato es posible determinar la masa de excremento presente en cada sustrato, y posteriormente el rendimiento de litros de metano por kilogramo de excreta. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 5.

| Biodigestor no. | % de excretas | Volumen de excretas [L] | Masa de excretas [kg] | Metano producido [L] | Metano por kg de excreta [L] |
|-----------------|---------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|
| 1               | 50            | 5                       | 4.6516                | 2.1375               | 0.4595                       |
| 2               | 66.67         | 6.66                    | 6.2025                | 0.8165               | 0.1316                       |
| 3               | 33.33         | 3.33                    | 3.1008                | 1.1486               | 0.3704                       |
| 4               | 50            | 5                       | 4.7611                | 43.8043              | 9.2005                       |
| 5               | 25            | 2.5                     | 2.3806                | 36.6201              | 15.3830                      |

**Tabla 5** Rendimiento de litros de biogás por kg de excreta.

Se observa que los sustratos a base de excremento ovino (biodigestores 4 y 5) tienen rendimientos ampliamente superiores a los sustratos a base de excreta porcina, las cuales no lograron superar los 0.5 L de metano/kg. En este rubro el sustrato más viable es el preparado con 25% de excretas de vaca y 75% de agua, el cual alcanzó los 15.3 L de metano/kg.

Según el Ministerio de Energía de Chile y et al [23], el poder calorífico del metano es de 10 kWh/m<sup>3</sup>, o bien:

$$C_p = 10 \frac{kWh}{m^3} \times \frac{1 m^3}{1000 L} = 10 Wh/L$$

Donde:

$C_p$  = poder calorífico del metano, kWh/m<sup>3</sup>, Wh/L.

Para plantas de generación de energía eléctrica pequeñas, con capacidades de generación menores a 150 kW, Wellinger y et al [24] proponen el uso de sistemas de generación que empleen motores Stirling, cuya eficiencia eléctrica se encuentra entre 30 y 40%, por lo cual se asumirá una eficiencia media del 35%.

Conociendo el valor calorífico del metano (10 Wh/L), estimando la cantidad de excrementos producidos diariamente y tomando en cuenta la recomendación de Wellinger y et al, es posible determinar la línea base de energía eléctrica generable en el rancho Los Dos hermanos a partir de los rendimientos de litros de metano/kg de excremento previamente estimados. Los resultados se presentan en la tabla 6.

Según la tabla 6, los sustratos a base de excretas de vaca y agua son los únicos que podrían satisfacer por completo la demanda eléctrica del rancho Los dos hermanos, la cual se estima en aproximadamente 80 kWh bimestrales.

| Biodigestor no. | Masa de excretas [kg/día] | L / día de metano producidos | kWh / día generables | kWh / bimestre generables |
|-----------------|---------------------------|------------------------------|----------------------|---------------------------|
| 1               | 9.4                       | 4.3195                       | 0.0151               | 0.9071                    |
| 2               | 9.4                       | 1.2374                       | 0.0043               | 0.2599                    |
| 3               | 9.4                       | 3.4820                       | 0.0122               | 0.7312                    |
| 4               | 160                       | 1472.07                      | 5.1523               | 309.1351                  |
| 5               | 160                       | 2461.28                      | 8.6145               | 516.8698                  |

**Tabla 6** Línea base de energía eléctrica generable en el rancho Los dos hermanos.

## Conclusiones

Con base en los resultados experimentales de las pruebas de biogás realizadas a 3 mezclas de excretas de cerdo / agua y 2 mezclas de excretas de vaca / agua, se concluye que estas últimas son más apropiadas para implementar un sistema de generación de energía eléctrica para autoabastecimiento, ya que en ambos casos la cantidad de metano producido permiten satisfacer la demanda eléctrica del rancho Los dos hermanos.

## Agradecimientos

Agradecemos a la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO por el apoyo recibido durante la realización de este proyecto a través del programa UNAM-DGAPA-PAPIME-PE102015.

## Referencias

[1] Santana, A., & Pound, B. (1980). *The production of biogas from cattle slurry, the effects of concentration of total solids and animal diet*. Trop Anim Prod 5:2. 130 – 135.

[2] San Thy, Preston, T. R. & J Ly. (2003) *Effect of retention time on gas production and fertilizer value of biodigester effluent*. Livestock Research for Rural Development 15 (7).

[3] K.J. Chae Jang AM. , Yim S.K., In S. Kim. (2008). *The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure*. Bioresource Technology 99 1–6.

[4] Lansing S., Raul Botero Botero, Jay F. Martin. (2008) *Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters*. Bioresource Technology 99 5881–5890.

[5] Atem, A.D. & Indiveri, M.E. & Llamas, S. (2010) *Biomass storage for further energy use through biogas production*. International Journal of hydrogen energy 35. 6048 – 6051.

[6] Ferrer, I. & Garfi, M. & Uggetti, E. & Ferrer-Martí, L. & Calderon, A. & Velo, E. (2011). *Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes*. Biomass and bioenergy 35 1668 – 1674.

[7] Sung-Mok Lee, Geun Hyub Kim, Jae-Hwa Lee.(2012) *Bio-gas production by co-fermentation from the brown algae, Laminaria japonica*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 18. 1512–1514

[8] M.S. Ak, M. Muz, O.T. Komesli, C.F. Gökçay. (2013) *Enhancement of bio-gas production and xenobiotics degradation during anaerobic sludge digestion by ozone treated feed sludge*. Chemical Engineering Journal 230. 499–505.

- [9] González-González, A., et al. (2013), *Energy self-sufficiency through hybridization of biogas and photovoltaic solar energy: an application for an Iberian pig slaughterhouse*, Journal of Cleaner Production, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.021>
- [10] Vera, I. & Estrada, M. & Martínez, J. & Ortiz, A. (2012) *Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte I: excretas de ganado bovino y porcino*. Ingeniería, Investigación y Tecnología. Volume 15, Issue 3, July–September 2014, Pages 429–436.
- [11] Vera, I. & Estrada, M. & Martínez, J. & Ortiz, A. (2015) *Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos urbanos*. Ingeniería, Investigación y Tecnología. Volume 16, Issue 3, July–September 2015, Pages 471–478.
- [12] González, J. R. & González, L. R. (2014). *Diseño y construcción de un prototipo experimental que permita estudiar la generación de biogás mediante materia Orgánica*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico Electricista. FES Cuautitlán – UNAM. Julio 2014, Páginas 61-63, 135–176.
- [13] Abdeshahian, P. & Lim, J. S. & Ho, W. S. & Hashim, H. & Tin Lee, C. (2016) *Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 60, July 2016, Pages 714–723.
- [14] Taseli, B. K. & Kilkis, B. (2016) *Ecological sanitation, organic animal farm, and cogeneration: Closing the loop in achieving sustainable development – A concept study with on-site biogas fueled trigeneration retrofit in a 900 – bed university hospital*. Energy and Buildings. Available online 14 July 2016. In Press, Accepted Manuscript — Note to users.
- [15] Chan, E. & Xia, A. & Murphy, J. D. (2016) *Can slurry biogas systems be cost effective without subsidy in Mexico?* Renewable Energy. Volume 95, September 2016, Pages 22–30.
- [16] Uddin, W. & Khan, B. & Shaukat, N. & Majid, M. & Mujtaba, G. & Mehmood, A. & Ali, S. M. & Younas, U. & Anwar, M. & Almeshal, A. M. (2016) *Biogas potential for electric power generation in Pakistan: A survey*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 54, February 2016, Pages 25–33.
- [17] Ríos, M. & Kaltschmitt, M. (2016) *Electricity generation potential from biogas produced from organic waste in Mexico*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 54, February 2016, Pages 384–395.
- [18] Bundhoo, Z. & Mauthoor, S. & Mohee, R. (2016) *Potential of biogas production from biomass and waste materials in the Small Island Developing State of Mauritius*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 56, April 2016, Pages 1087–1100.
- [19] Piwowar, A. & Dzikuc, M. & Adamczyk, J. (2016) *Agricultural biogas plants in Poland – selected technological, market and environmental aspects*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 58, May 2016, Pages 69–74.
- [20] Silva dos Santos, I. F. & Barros, R. M. & Tiago Filho, G. L. (2016) *Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential*. Journal of Cleaner Production. Volume 126, 10 July 2016, Pages 504–514.

[21] Ware, A. & Power, N. (2016) *Biogas from cattle slaughterhouse waste: Energy recovery towards an energy self-sufficient industry in Ireland*. Renewable Energy. Volume 97, November 2016, Pages 541–549.

[22] Khan, E. U. & Martin, A. R. (2016) *Review of biogas digester technology in rural Bangladesh*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 62, September 2016, Pages 247–259.

[23] Ministerio de Energía de Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. Manual de Biogás. 1ª edición, Chile, FAO, 2011, página 54.

[24] Wellinger, A. & Murphy, J. & Baxter, D. *The Biogas Handbook: Science, production and applications*. 1ª edición, Reino Unido, Woodhead Publishing Series in Energy: Number 52, página 437.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. El biogás. Producción y utilización. 1ª edición, Italia, 1983.

Deublein, D. y Steinhauser, A. *Biogas from waste and renewable resources*. 1ª edición, Alemania, 2008.

T. Al Seadi, D. Rutz, H. Prassl, M. Köttner, T. Finsterwalder, S. Volk, y R. Janssen. *Biogas handbook*. 1ª edición, Dinamarca, University of Southern Denmark Esbjerg, 2008.

Ministerio de Energía de Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. Manual de Biogás. 1ª edición, Chile, FAO, 2011.

## Instrucciones para Autores

---

### [Titulo en Times New Roman y Negritas No.14]

Apellidos en Mayusculas -1er Nombre de Autor †, Apellidos en Mayusculas -2do Nombre de Autor  
*Correo institucional en Times New Roman No.10 y Cursiva*

(Indicar Fecha de Envio:Mes,Dia, Año); Aceptado(Indicar Fecha de Aceptación: Uso Exclusivo de ECORFAN)

---

#### Resumen

Titulo

Objetivos, metodología

Contribución

(150-200 palabras)

#### Abstract

Title

Objectives, methodology

Contribution

(150-200 words)

**Indicar (3-5) palabras clave en Times New Roman y Negritas No.11**

#### Keyword

---

**Cita:** Apellidos en Mayúsculas -1er Nombre de Autor †, Apellidos en Mayusculas -2do Nombre de Autor. Titulo del Paper. Título de la Revista. 2015, 1-1: 1-11 – [Todo en Times New Roman No.10]

---

---

† Investigador contribuyendo como primer autor.

# Instrucciones para Autores

## Introducción

Texto redactado en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Explicación del tema en general y explicar porque es importante.

¿Cuál es su valor agregado respecto de las demás técnicas?

Enfocar claramente cada una de sus características

Explicar con claridad el problema a solucionar y la hipótesis central.

Explicación de las secciones del artículo

## Desarrollo de Secciones y Apartados del Artículo con numeración subsecuente

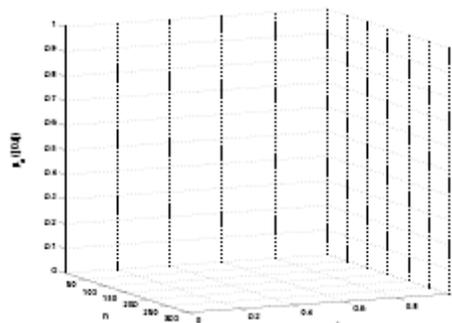
[Título en Times New Roman No.12, espacio sencillo y Negrita]

Desarrollo de Artículos en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

## Inclusión de Gráficos, Figuras y Tablas-Editables

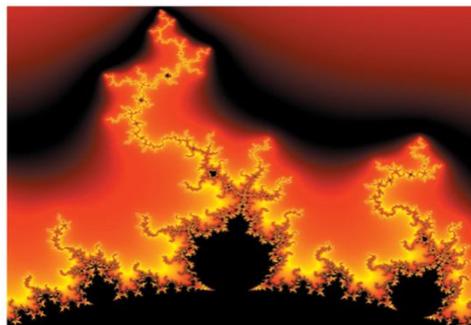
En el *contenido del artículo* todo gráfico, tabla y figura debe ser editable en formatos que permitan modificar tamaño, tipo y número de letra, a efectos de edición, estas deberán estar en alta calidad, no pixeladas y deben ser notables aun reduciendo la imagen a escala.

[Indicando el título en la parte inferior con Times New Roman No.10 y Negrita]



**Grafico 1** Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.



**Figura 1** Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

**Tabla 1** Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

Cada artículo deberá presentar de manera separada en **3 Carpetas**: a) Figuras, b) Gráficos y c) Tablas en formato .JPG, indicando el número en Negrita y el Titulo secuencial.

## **Instrucciones para Autores**

---

**Para el uso de Ecuaciones, señalar de la siguiente forma:**

$$Y_{ij} = \alpha + \sum_{h=1}^r \beta_h X_{hij} + u_j + e_{ij} \quad (1)$$

Deberán ser editables y con numeración alineada en el extremo derecho.

### **Metodología a desarrollar**

Dar el significado de las variables en redacción lineal y es importante la comparación de los criterios usados

### **Resultados**

Los resultados deberán ser por sección del artículo.

### **Anexos**

Tablas y fuentes adecuadas.

### **Agradecimiento**

Indicar si fueron financiados por alguna Institución, Universidad o Empresa.

### **Conclusiones**

Explicar con claridad los resultados obtenidos y las posibilidades de mejora.

### **Referencias**

Utilizar sistema APA. **No** deben estar numerados, tampoco con viñetas, sin embargo en caso necesario de numerar será porque se hace referencia o mención en alguna parte del artículo.

### **Ficha Técnica**

Cada artículo deberá presentar un documento Word (.docx):

Nombre de la Revista

Título del Artículo

Abstract

Keywords

Secciones del Artículo, por ejemplo:

1. *Introducción*
2. *Descripción del método*
3. *Análisis a partir de la regresión por curva de demanda*
4. *Resultados*
5. *Agradecimiento*
6. *Conclusiones*
7. *Referencias*

Nombre de Autor (es)

Correo Electrónico de Correspondencia al Autor

Referencia

**Formato de Originalidad**



Sucre, Chuquisaca \_\_\_\_ de \_\_\_\_ del 20 \_\_\_\_

Entiendo y acepto que los resultados de la dictaminación son inapelables por lo que deberán firmar los autores antes de iniciar el proceso de revisión por pares con la reivindicación de ORIGINALIDAD de la siguiente Obra.

Artículo (Article):

---

Firma (Signature):

---

Nombre (Name)

**Formato de Autorización**



Sucre, Chuquisaca \_\_\_\_ de \_\_\_\_ del 20 \_\_\_\_

Entiendo y acepto que los resultados de la dictaminación son inapelables. En caso de ser aceptado para su publicación, autorizo a ECORFAN-Bolivia a difundir mi trabajo en las redes electrónicas, reimpresiones, colecciones de artículos, antologías y cualquier otro medio utilizado por él para alcanzar un mayor auditorio.

I understand and accept that the results of evaluation are inappealable. If my article is accepted for publication, I authorize ECORFAN-Bolivia to reproduce it in electronic data bases, reprints, anthologies or any other media in order to reach a wider audience.

Artículo (Article):

\_\_\_\_\_  
Firma (Signature)

\_\_\_\_\_  
Nombre (Name)

# Revista de Sistemas Experimentales

