

# CONTROL DIFUSO BASADO EN MICROCONTROLADOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN DIGESTIÓN ANAEROBIA TIPO BATCH DE FRACCIÓN ORGÁNICA DE RESIDUOS SÓLIDOS



## MICROCONTROLLER-BASED FUZZY CONTROL FOR BIOGAS PRODUCTION IN BATCH ANAEROBIC DIGESTION OF SOLID WASTE ORGANIC FRACTION

### AUTOR

ILBER ADONAYT RUGE RUGE  
Magister en Ingeniería de Control Industrial  
\*Universidad de Cundinamarca  
Docente Tiempo Completo Ocasional  
Grupo de Investigación GITEINCO  
ilberruge@yahoo.es  
COLOMBIA

### INSTITUCIÓN

\*UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA  
Sede Fusagasugá  
UDEP  
Universidad Publica  
Diagonal 18 No. 20 - 29  
www.unicundi.edu.co  
COLOMBIA

### AUTOR

HÉCTOR MAURICIO HERNÁNDEZ SARABIA  
Ph.D (c) en Bioingeniería  
\*\*Universidad de Ibagué  
Docente Asociado  
Grupo de Investigación GMAE  
mauricio.hernandez@unibague.edu.co  
COLOMBIA

### INSTITUCIÓN

\*\*UNIVERSIDAD DE IBAGUÉ  
UNIBAGUE  
Universidad Privada  
Carrera 22 Calle 67 Barrio Ambala  
www.unibague.edu.co  
COLOMBIA

**INFORMACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN O DEL PROYECTO:** El proyecto nace como una necesidad de aporte a la investigación en el área de energías alternativas, con base en las políticas de Desarrollo y Planeación Departamental de Cundinamarca y en los objetivos estratégicos del Plan de Competitividad para la provincia de Sumapaz. El desarrollo del proyecto inicio en Abril de 2010 y finalizo en Abril de 2011, cuyos resultados fueron expuestos y sustentados para optar al titulo de Magister en Ingeniería de Control Industrial de la Universidad de Ibagué. Actualmente se trabaja en asocio con la Alcaldía Municipal de Fusagasugá, UMATA, CAR y la Asociación de trabajadores de la Plaza de Mercado de Fusagasugá en el proyecto de Aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, con el propósito de proyectar los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, y buscar un impacto social positivo y progresista para el municipio de Fusagasugá.

**RECEPCIÓN:** Noviembre 6 de 2011

**ACEPTACIÓN:** Noviembre 28 de 2011

**TEMÁTICA:** Electrónica

**TIPO DE ARTÍCULO:** Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

**RESUMEN ANALITICO**

El manejo de los residuos sólidos generados por la población se convierte en un factor relevante por su impacto social y ambiental. Un manejo inadecuado de los mismos provoca entre otros aspectos enfermedades, contaminación de fuentes hídricas, del suelo y del aire por solo mencionar algunos. El biogás contiene un alto porcentaje en metano, CH<sub>4</sub> (entre 50-70%), por lo que es susceptible de un aprovechamiento energético mediante su combustión en motores, en turbinas o en calderas, bien sólo o mezclado con otro combustible. Por lo anterior se plantea el desarrollo de este trabajo de investigación, en busca de aportar un conocimiento más en el campo de la digestión anaeróbica como alternativa energética, pues en Colombia este tipo de investigaciones no ha sido ampliamente realizado. Además, se incorpora elementos tecnológicos tales como los microcontroladores, los cuales se usaran como dispositivo controlador primario si se piensa en un sistema de desarrollo a bajo costo.

**PALABRAS CLAVES:** Biogás, Control Difuso, Microcontrolador, Digestión Anaerobia

**ANALYTICAL SUMMARY**

The solid waste management generated by the citizen population becomes an important social factor and environmental impact. Improper handling of solid waste cause diseases, water, soil and air pollution. Biogas contains a high methane percentage CH<sub>4</sub> (50-70%), making it susceptible to recovery energy through engines combustion, turbines or boilers, alone or mixed with other fuel. The proposes the development of this research, seeking to provide more background information on the field of anaerobic digestion as an alternative energy in Colombia because such research has not been widely performed. Also incorporate technological elements such as microcontrollers, which were used as primary control device a low-cost development.

**KEYWORDS:** Biogas, Fuzzy Control, Microcontroller, Anaerobic Digestion

**INTRODUCCIÓN**

El manejo de los residuos sólidos generados por la población se convierte en un factor relevante por su impacto social y ambiental. Un manejo inadecuado de los mismos provoca entre otros aspectos enfermedades, contaminación de fuentes hídricas, del suelo y del aire por solo mencionar algunos. Todos estos elementos afectan directamente el bienestar de la población y son alterados directamente por el crecimiento de la población y el aumento en la producción de residuos.

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o "biogás" (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, etc.), en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación.

El biogás contiene un alto porcentaje en metano, CH<sub>4</sub> (entre 50-70%), por lo que es susceptible de un aprovechamiento energético mediante su combustión en motores, en turbinas o en calderas, bien sólo o mezclado con otro combustible (IDAE, 2007).

Por lo anterior se plantea el desarrollo de este trabajo de investigación, en busca de aportar un conocimiento más en el campo de la digestión anaeróbica como alternativa energética, pues en Colombia este tipo de investigaciones no ha sido ampliamente realizado.

**1. DIGESTION ANAEROBICA DE RESIDUOS SOLIDOS ORGANICOS**

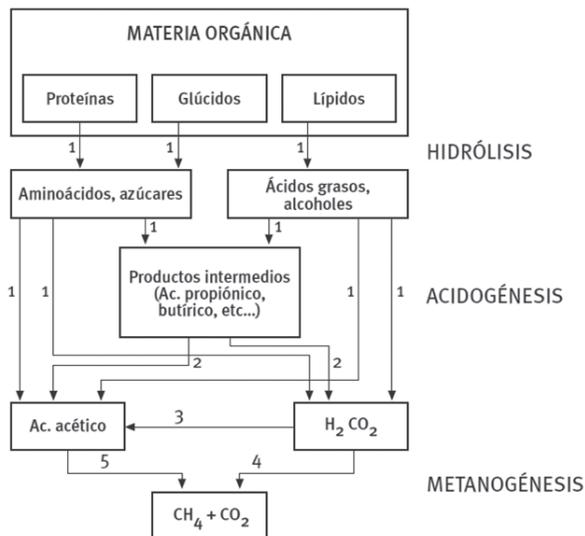
El manejo de los residuos sólidos orgánicos RSU se ha convertido mas en un problema que en una solución; en ellos, el empleo de rellenos sanitarios se ha considerado como la "solución final" sin que sea esto del todo cierto ya que en realidad lo que se esta haciendo es tapar

el problema mediante un entierro digno de los RSU, mientras se generan contaminantes como los gases que se escapan a la atmósfera y los líquidos que se filtran y contaminan aguas subterráneas o ríos aledaños (G. López, 2004).

Una opción de aprovechamiento de los RSU actuales, es la conversión biológica y química de los mismos, la cual requiere de la adecuación de digestores que sirvan de recepción de los RSU para propiciar el ambiente ideal para el proceso con ambiente anaeróbico, siendo este medio el necesario para la producción de biogás. Este proceso requiere del control en el porcentaje de humedad, la temperatura, el pH, disposición de ductos para evacuar el gas y los líquidos generados, además de disponer de una zona de cargue de los mismos una vez procesados.

La digestión anaerobia está caracterizada por la existencia de varias fases consecutivas diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato (término genérico para designar, en general, el alimento de los microorganismos), interviniendo 5 grandes poblaciones de microorganismos, tal como lo muestra la Figura 1.

**FIGURA 1.** Fases de la fermentación anaeróbica de Residuos Sólidos Orgánicos para la producción de biogás.



Estas poblaciones se caracterizan por estar compuestas por seres de diferentes velocidades de crecimiento y diferente sensibilidad a cada compuesto intermedio como inhibidor (por ejemplo,  $H_2$ , ácido acético o amoníaco producido de la acidogénesis de aminoácidos). Esto implica que cada etapa presentará diferentes velocidades de reacción según la composición del

sustrato y que el desarrollo estable del proceso global requerirá de un equilibrio que evite la acumulación de compuestos intermedios inhibidores o la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), que podría producir una bajada del pH, y por consiguiente la no producción de biogás (IDAE, 2007).

En general, la velocidad del proceso está limitada por la velocidad de la etapa más lenta, la cual depende de la composición de cada residuo. Para sustratos solubles, la fase limitante acostumbra a ser la metanogénesis, y para aumentar la velocidad la estrategia consiste en adoptar diseños que permitan una elevada concentración de microorganismos acetogénicos y metanogénicos en el reactor. Para residuos en los que la materia orgánica esté en forma de partículas, la fase limitante es la hidrólisis, proceso enzimático cuya velocidad depende de la superficie de las partículas. Usualmente, esta limitación hace que los tiempos de proceso sean del orden de semanas, de dos a tres. Para aumentar la velocidad, una de las estrategias es el pretratamiento para disminuir el tamaño de partículas o ayudar a la solubilización (maceración, ultrasonidos, tratamiento térmico, alta presión, o combinación de altas presiones y temperaturas).

## 2. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Se requiere someter a un proceso de digestión anaeróbica dentro de un reactor tipo batch (reactor donde no hay flujo de entrada ni de salida), una muestra de materia orgánica representada exclusivamente por los desechos de alimentos provenientes de restaurante, y evaluar el efecto de la temperatura en la calidad de la producción de biogás. Según datos mostrados por W. Man-Chan (2005), las fluctuaciones de temperatura en un proceso de digestión anaeróbica de residuos sólidos orgánicos municipales, puede influir en la producción de biogás y la concentración del  $CH_4$  del mismo, por tanto la variable Temperatura se convierte en la variable que se desea controlar para evaluar tales efectos en la calidad del biogás generado en el proceso de digestión anaerobia. La calidad del biogás se mide en términos de la Concentración Volumétrica del Metano ( $CH_4$ ) y Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ), puesto que la calidad del biogás depende principalmente de la presencia de estos gases (T. Mandal, 1999) y (P. Vindis, 2008). Por otro lado, según lo expuesto por A. Fernández (2007), los Residuos Sólidos Urbanos de origen Domiciliario contienen un promedio del 70% de contenido orgánico, lo cual lo hace adecuado para el objeto de estudio.

Los desechos de alimentos fueron obtenidos del Restaurante Manila's Food del Centro Comercial Manila de la ciudad de Fusagasugá departamento de Cundinamarca. Los residuos de comida recolectados,

consisten de cascara de papa común, cascara de vegetales, cascara de zanahoria y cascara de frutas. Las proporciones utilizadas para la preparación del sustrato del reactor son iguales debido a su igual proporción de generación en la fuente (Ver Tabla 1).

La muestra de prueba fue preparada mezclando 400gr de la Fracción de Residuos Sólidos Total (FRST) y 1200 ml de agua de grifo, previamente reposada durante 2 horas para eliminar los efectos del cloro que pueden eliminar la población bacteriana. Para la inoculación de la materia orgánica se utilizó 20 gr. de Septitrim, el cual es un producto biológico basado en cultivo de bacterias no patogénicas especializadas, de uso común en pozos sépticos y sistemas de tratamiento de aguas anaeróbicos. El uso de Septitrim optimiza el funcionamiento garantizando una población bacteriana especializada y suficiente, capaz de degradar la carga orgánica que se deposita en el reactor anaeróbico. El sustrato obtenido es depositado en el reactor anaeróbico con capacidad de 3 Litros, y se dispuso de la mitad de su capacidad para almacenamiento de biogás generado en el proceso de fermentación. La relación de mezcla 1:3 entre el sustrato y agua, se toma según criterio dado por K. Komemoto (2009).

**TABLA 1.** Composición de la materia orgánica a partir de desechos de comida provenientes de restaurante.

COMPONENTE	Fracción de Residuos Sólidos Totales (%)
Cascara de Frutas (Papaya, mandarina, banano, naranja)	25
Cascara de Vegetales (Pepino y Espinaca)	25
Cascara de Zanahoria	25
Cascara de papa	25

El pH de la muestra inicial depositada en el reactor anaeróbico fue medido con un pHmetro digital Checker by Hanna HI 98103, el cual registro un valor de 6.85. De acuerdo a lo descrito por A. Guevara (1996), este valor de pH se encuentra dentro del rango deseado (6.5–7.5), ya que si la muestra presenta un nivel de acidez alto (pH inferior a 6.5), esta es una de las causas de inhibición de las bacterias metanogénicas.

En laboratorio químico se realizó el Análisis de Demanda Química de Oxígeno (DQO) de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos ya inoculada, que inicialmente alimenta al reactor anaeróbico. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

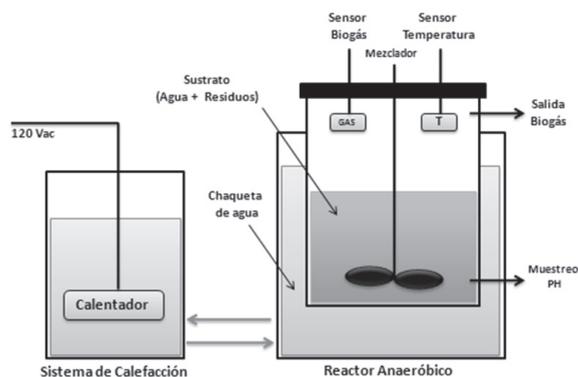
Para evaluar los efectos de la temperatura en la calidad del biogás, el experimento fue realizado durante un

periodo de 40 días. El reactor fue sellado herméticamente y se mantuvo una agitación constante a 120 rpm una vez cada 24 horas.

**TABLA 2.** Análisis químico de la muestra de materia orgánica bajo estudio.

Parámetro	Método	Valor	Unidad
Sólidos Totales	2540D	19.23	mg/l
Sólidos Suspendidos Volátiles	2540E	21.6	mg/l
Nitrógeno Orgánico	4500NH3B	1.83	mg/l N
Fósforo Orgánico	4500P	0.3	mg/l P
Potasio	3111B	1.92	mg/l K
Calcio	31111D	2.94	mg/l Ca
Magnesio	3111B	0.04	mg/l Mg
Demanda Química de Oxígeno	5220B	31.23	mg/l

**FIGURA 2.** Diagrama de bloques del digestor anaeróbico



## 2.1 DISEÑO DE CONTROLADOR DIFUSO PARA TEMPERATURA

Los criterios de selección para optar por el diseño de un controlador difuso para la regulación de temperatura en el digestor anaeróbico fueron básicamente la relación no lineal de la Temperatura con la actividad microbiana durante el proceso de digestión anaeróbica (J. Van Lier, 1995), y por otro lado, este método de control usa una caja negra (Black Box) enfocado a determinar la relación entre la variable manipulada (CV) y la variable del proceso (PV) sin incorporar ninguna información acerca de los detalles tanto físicos como químicos dentro del

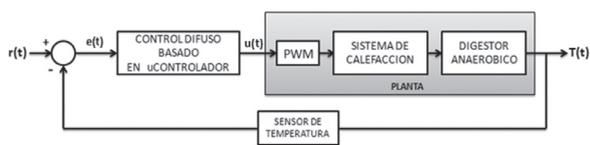
sistema anaeróbico (M. Huzmezan, 2002), que dada la complejidad de la composición de la materia orgánica y la variación misma de las reacciones dentro del digestor, la obtención de un modelo matemático se convierte en una tarea ardua y difícil de realizar.

Según N. Kanagaraj (2006), en el desarrollo de sistemas de aplicación en tiempo real existen algunas restricciones como la capacidad de memoria para el código fuente de la aplicación, el consumo de energía del módulo, la velocidad de procesamiento, la complejidad del algoritmo, el costo de hardware y software, etc., Un software eficiente y el diseño de hardware para un sistema embebido basado en procesador se traduce en reducción de costos, un aspecto importante que se desea a la par con el objetivo principal del proyecto de investigación abordado.

La lógica difusa es más eficaz en sistemas de control en lazo cerrado y quizás más fácil de implementar en sistemas que van desde un microcontrolador embebido hasta una amplia red de computadoras con múltiples canales de adquisición de datos y sistemas de control (N. Kanagaraj, 2006).

La propuesta del sistema de control que permita mantener el punto de operación dentro del rango de temperaturas mesofílico (25oC – 45oC); por ser este el rango de temperatura seleccionado para evaluar los efectos de la temperatura en la calidad del biogás generado en proceso de digestión anaeróbico, se muestra en la Figura 3.

**FIGURA 3.** Control difuso basado en Microcontrolador



El punto de operación inicial que se establece en el digestor anaeróbico es de 35oC. La variación del punto de operación dentro del rango de temperatura mesofílico, permitirá evaluar y registrar los efectos de la temperatura en la calidad del biogás generado en el reactor anaeróbico.

El sensor de temperatura utilizado es el DS18S20 de la Dallas Semiconductor, el cual es un termómetro digital que entrega la medida de la temperatura mediante un dato a 9 bits. El DS18S20 se comunica mediante un bus 1-Wire que por definición solo requiere una línea de datos para comunicarse con un procesador.

Para el monitoreo de las concentraciones volumétricas del gas Metano y el Dióxido de Carbono se utilizó el sensor de gas IR15TT-R de la empresa e2v, el cual posee dos canales para detección simultánea de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> y cuenta con un rango de medición de 0 hasta 100%vol.

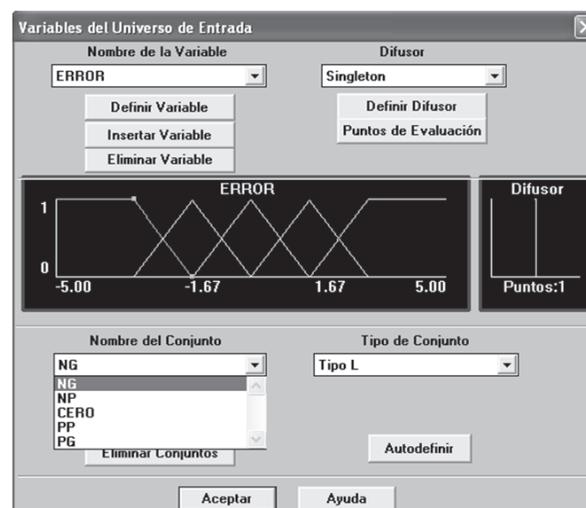
## 2.2 CONTROL DIFUSO CON UNFuzzy

La señal de entrada al controlador difuso es la señal de ERROR, correspondiente a la diferencia aritmética entre la señal de referencia y la señal de salida de temperatura, medida por medio del sensor DS18S20.

Las variables lingüísticas definidas para la señal de entrada ERROR son:

- NG: Negativo Grande
- NP: Negativo Pequeño
- CERO: Cero
- PP: Positivo Pequeño
- PG: Positivo Grande

**FIGURA 4.** Definición de conjuntos difusos de la variable ERROR



Se cuenta con un calentador eléctrico manipulado mediante modulación de ancho de pulso PWM, el cual es controlado por la señal de control  $u(t)$  conformado por un dato digital de 8 bits suministrado por el bloque de control difuso basado en microcontrolador, y donde el dato digital d'0' corresponde a un suministro mínimo de voltaje RMS al elemento calefactor y el dato d'255' corresponde a un suministro máximo de voltaje RMS al elemento calefactor. Por tanto, el Universo de discurso para la variable CONTROL queda definida entre [0,255],

dado que la resolución obtenida con un dato digital a 8 bits es de:

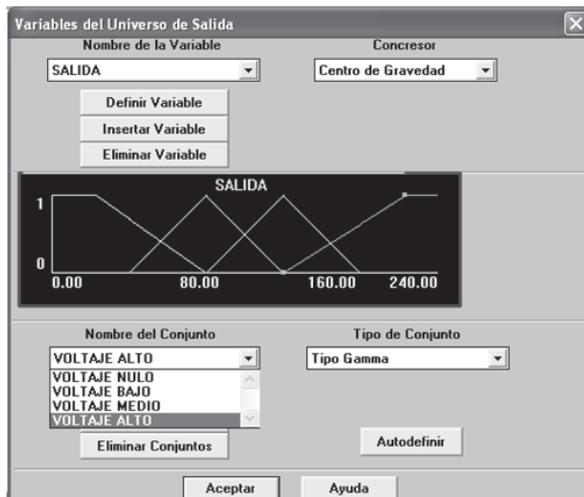
$$\begin{aligned} \text{Resolución} &= 2^n - 1 = 2^8 - 1 \\ &= 255 \quad \text{Ecuación 1} \end{aligned}$$

Donde  $n$  es el número de bits de la palabra de control.

Las variables lingüísticas definidas para la señal de salida CONTROL son:

- VOLTAJE NULO
- VOLTAJE BAJO
- VOLTAJE MEDIO
- VOLTAJE ALTO

**FIGURA 5.** Definición de los conjuntos difusos de la variable CONTROL.



El tipo de Concesor (DeFuzzyfier) utilizado es el de tipo CENTRO DE GRAVEDAD, por ser este uno de los métodos más populares para calcular el valor concreto de salida en un Sistema de Lógica Difusa.

$$\text{defuzz} = \frac{\sum y_{mf} \cdot x_{mf}}{\sum y_{mf}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $x_{mf}$  es el vector de valores de la función de membresía de entrada y  $y_{mf}$  es el vector de valores de la función de membresía del vector  $x_{mf}$ .

La base de reglas para el sistema de lógica difusa se definió considerando que el sistema de calefacción a

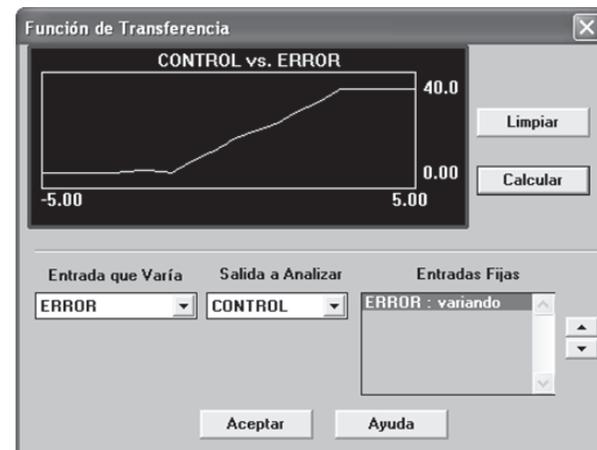
través del sistema de recirculación constante hacia la chaqueta de agua que rodea el digesor, suministre la temperatura adecuada para mantener el error en estado estacionario igual a cero; es decir, que la temperatura dentro del reactor sea igual al valor establecido por el valor de referencia, el cual es establecido inicialmente en 35°C.

**TABLA 3.** Base de Reglas para Controlador Difuso

ERROR	NG	NP	CERO	PP	PG
Control	Voltaje nulo	Voltaje nulo	Voltaje bajo	Voltaje medio	Voltaje alto

La Función de Transferencia del sistema de control difuso permite visualizar la relación existente entre la Entrada (ERROR) y la Salida (CONTROL).

**FIGURA 6.** Superficie de control del sistema difuso

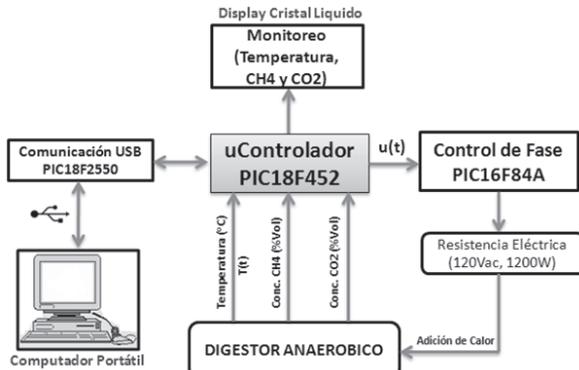


La Figura 6 muestra una superficie de control con una relación proporcional positiva para un rango de la señal de ERROR entre  $[-3,3]$ , lo cual lo hace adecuado para su implementación. Por otro lado, la superficie de control no presenta cambios bruscos para ningún valor del Universo de Discurso de la señal de entrada.

### 2.3 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO

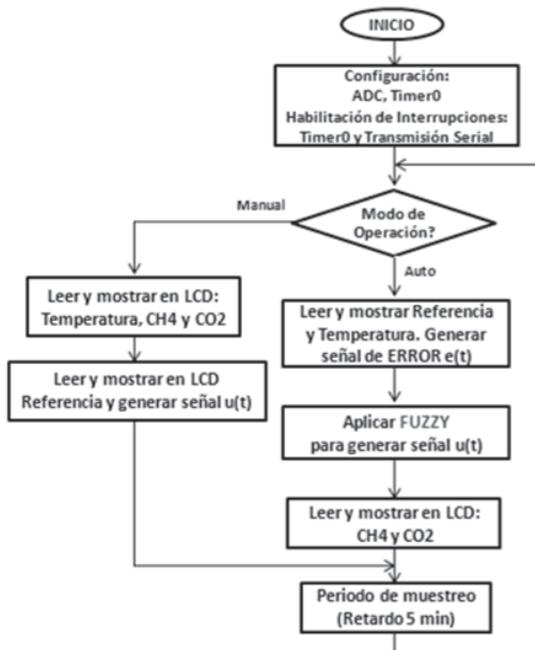
Un microcontrolador de 8 bits PIC18F452 de Microchip fue seleccionado como procesador embebido, para implementar el algoritmo de control difuso para la regulación de temperatura en el digesor anaeróbico.

**FIGURA 7.** Diagrama de bloques del sistema de control de Temperatura basado en microcontrolador



El algoritmo de control difuso y manejo de periféricos del sistema en general fue escrito en Lenguaje C, utilizando el software de desarrollo CCS PIC C Compiler. El diagrama de flujo de los procedimientos involucrados en el desarrollo del código fuente se muestra en la Figura 8.

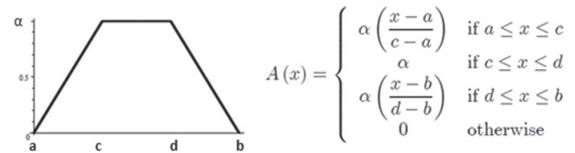
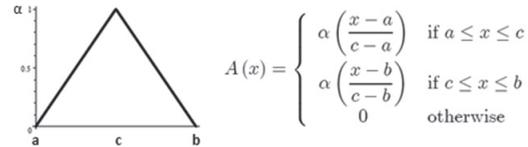
**FIGURA 8.** Diagrama de flujo de algoritmo implementado en el microcontrolador



Para el controlador difuso se creó la librería Fuzzy() cuyo parámetro de entrada es la señal de error e(t) y el parámetro de retorno es la señal de control u(t).

Para el bloque fuzzificador se utilizaron funciones de pertenencia de tipo triangular y trapezoidal y el universo de discurso está comprendido entre [-5.0 5.0] según se muestra en la Figura 9.

**FIGURA 9.** Definición de funciones de pertenencia de entrada.



El código fuente en Lenguaje C para la definición de estas funciones de pertenencia se muestra en la siguiente figura:

**FIGURA 10.** Código fuente para funciones de pertenencia triangular y trapezoidal.

```
//-----
// Funciones de pertenencia de la Entrada
//-----
void trian(float x)
{
    if (x<=a) y=0;
    if (x<=b&&x>a) y= (x-a)/(b-a);
    if (x<c&&x>b) y=(c-x)/(c-b);
    if (x>=c) y=0;
}

void trapmfiz(float x)
{
    if (x<=a) y=1;
    if (x<=b&&x>a) y= (b-x)/(b-a);
    if (x>b) y=0;
}

void trapmfer(float x)
{
    if (x<=a) y=0;
    if (x<=b&&x>a) y= (x-a)/(b-a);
    if (x>b) y=1;
}
```

Por tanto, la definición de los conjuntos difusos de entrada está definida como lo muestra la figura 11.

**FIGURA 11.** Código fuente para definición de conjuntos difusos de entrada.

```

//-----
//Definicion Conjuntos Difusos de Entrada
//-----
// Conjunto Borroso NG
//-----
a=-3.0;b=-1.5; trapmfiz(x); NG= y;
//-----
//Conjunto Borroso NP
//-----
a=-3.0;b=-1.5;c=0.0; trian(x); NP= y;
//-----
//Conjunto Borroso CERO
//-----
a=-1.5;b=0.0;c=1.5; trian(x); CERO= y;
//-----
// Conjunto Borroso PP
//-----
a=0.0;b=1.5;c=3.0; trian(x); PP= y;
//-----
// Conjunto Borroso PG
//-----
a=1.5;b=3.0; trapmfder(x); PG=y;

```

Las funciones de pertenencia de salida están definidas bajo el mismo fundamento matemático de las funciones de pertenencia de entrada.

**FIGURA 12.** Código fuente para definición de conjuntos difusos de salida.

```

//-----
// Funciones de Pertenencia de Salida
//-----
void desbtrapder(float y)
{
  datos[num]=y;
  W[num]=(y*(b-a))+a;
}
void desbtrapiz(float y)
{
  datos[num]=y;
  W[num]=(y*(-b+a))+b;
}
void desbtriang (float y)
{
  datos[num]=y;
  W[num]=(y*(b-a))+a;
  num++;
  datos[num]=y;
  W[num]=(y*(-c+b))+c;
}

```

De acuerdo a la definición de la Base de Reglas mostrada en la Tabla 3, el código fuente correspondiente al motor de inferencia se muestra en la Figura 13.

**FIGURA 13.** Código fuente para Base de reglas.

```

//-----
// Base de Reglas del controlador para una sola Entrada
//-----

for(num=0;num<8;num++)
{
  datos[num]=0;
  W[num]=0;
}

num=0;

if (NG>0) //APAGAR
{
  a=28.0;b=96.0;y=NG;desbtrapiz (y);
}
if (NP>0) //APAGAR
{
  a=28.0;b=96.0;y=NP;num++;desbtrapiz (y);
}
if (CERO>0) //MANTENER
{
  a=48.0;b=96.0;c=144.0;y=CERO;num++;desbtriang (y);
}
if (PP>0) //MEDIO ENCENDER
{
  a=96.0;b=144.0;c=192.0;y=PP;num++;desbtriang (y);
}
if (PG>0) //ENCENDER
{
  a=144.0;b=220.0;y=PG;num++;desbtrapder (y);
}

```

El código fuente correspondiente al método de Desfuzzificación se muestra en la Figura 14.

**FIGURA 14.** Código fuente para Desfuzzificación.

```

//-----
// Metodo de Desborrificación
//-----

// Creating Custom Defuzzification Functions
// Fuzzy Logic Toolbox User Guide page 100

Mx=0;
Yx=0;

for (num=0; num<8; num++)
{
  Mx=Mx+datos[num];
  Yx=Yx+datos[num]*W[num];
}

Salida= Yx/Mx;

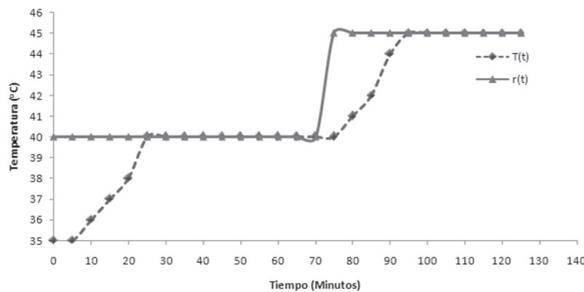
}

```

### 3. RESULTADOS

El desempeño del sistema de control difuso fue probado experimentalmente para regular la temperatura en condiciones mesofílicas. Se estabilizó inicialmente el sistema a 35°C, y posteriormente se realizaron cambios de tipo escalón unitario en el set point a valores de 40°C y 45°C para evaluar el comportamiento del controlador difuso basado en microcontrolador.

**FIGURA 15.** Respuesta del sistema de control difuso basado en microcontrolador.



Según los resultados, los parámetros de desempeño del controlador difuso basado en microcontrolador son:

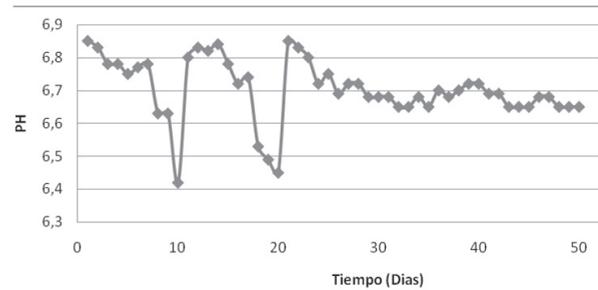
- Máximo Sobre pico: 0%
- Tiempo de Estabilización: 25 min.
- Error en Estado Estacionario: 0%
- Tiempo Muerto: 2.5 min.

Según lo mencionado por K. Komemoto (2009), el tiempo estimado para el proceso de digestión anaeróbica es de 30 días aproximadamente dado su capacidad volumétrica y características del sustrato. Bajo esta condición se puede determinar que el sistema de control es adecuado para las pruebas que se desean efectuar para determinar el efecto de la temperatura en la calidad del biogás generado dentro del digestor. Es importante resaltar el efecto positivo del proceso de agitación, el cual se realizó a 120 rpm durante 2 horas con una frecuencia de 2 veces cada 24 horas, dado que dicho parámetro permitió que la estabilización de la temperatura fuese más rápido con respecto a la ausencia de la agitación.

Durante todo el proceso de reacción anaeróbica, el pH del sustrato en el digestor anaeróbico se mantuvo dentro del rango de 6.5-7.5. El procedimiento utilizado para la medición y corrección del pH dentro del reactor se realizó de la siguiente manera:

- Toma de 10 ml de muestra de sustrato utilizando como elemento extractor una jeringa de 10 ml. La toma de muestra fue realizada una vez terminado el proceso de agitación programado de 2 horas con una frecuencia de 2 veces cada 24 horas.
- Calibración de pHmetro marca Checker by Hanna HI 98103 con buffer 7.0.
- Toma de lectura de pH. Esta lectura se realiza dos veces para validar el resultado de la lectura. El valor final registrado es el promedio de las dos lecturas de pH.

**FIGURA 16.** Comportamiento del pH durante el proceso de digestión anaeróbica.

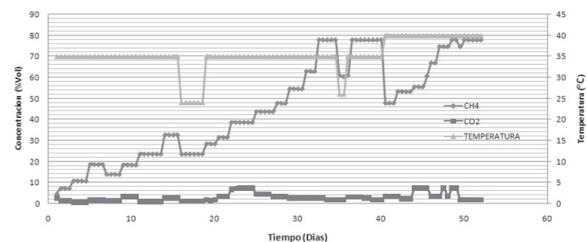


Para los días 10 y 20 del experimento fue necesario ajustar el valor de pH, dado su decremento por debajo del valor límite inferior establecido de 6.5. Para el ajuste de pH se utilizó una solución de Hidróxido de Sodio NaOH a una concentración 1M, el cual fue incorporado al digestor por medio del orificio dispuesto para toma de muestra de pH. Una vez depositada la solución para el ajuste del pH, se programó un proceso de agitación de 2 horas. Terminado el proceso de agitación se procedió a realizar una nueva toma de sustrato para la medición del pH según el procedimiento descrito anteriormente. Este proceso se realizó hasta obtener una lectura de pH de 6.80, el cual se encuentra dentro del rango de operación deseado.

Para los días posteriores al día 24 del experimento, el pH se mantuvo dentro del rango deseado, por tanto no fue necesario realizar nuevos ajustes de pH.

La calidad del biogás fue medido en términos del porcentaje volumétrico de la Concentración del Metano (CH<sub>4</sub>) y Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), puesto que la calidad del biogás depende principalmente de la presencia de estos gases (T. Mandal, 1999) y (P. Vindis, 2008). La frecuencia de muestreo para el registro del valor de la Concentración tanto del CH<sub>4</sub> como del CO<sub>2</sub> fue 2 muestras/día (muestreo cada 12 horas).

**FIGURA 17.** Efectos de la temperatura en la calidad del biogás.

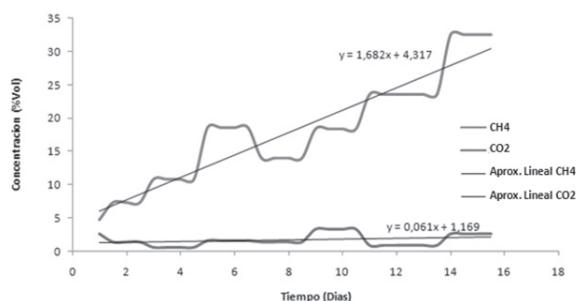


#### 4. ANALISIS DE RESULTADOS

Inicialmente se registra una actividad en la producción de Metano del 4.7%Vol y de 2.6%Vol en la Concentración del Dióxido de carbono. Para los primeros 16 días de la prueba, se puede observar una tendencia de incremento de 1.682 %Vol/día en la Concentración del gas Metano, y por otro lado, una tendencia de incremento casi nula en la Concentración del Dióxido de Carbono correspondiente a 0.061 %Vol/día, tal como se muestra en la Figura 18.

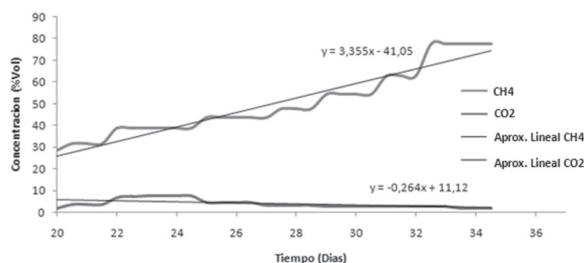
En el periodo de prueba correspondiente a los días 16 al 19, se presentó una avería en la bomba de circulación que forma la chaqueta de agua para la regulación de temperatura en el reactor. Debido a esta falla de funcionamiento, la digestión anaerobia funcionó a temperatura ambiente (24°C) durante este periodo de tiempo. El efecto debido a la variación de temperatura muestra un decremento en la Concentración del gas Metano, pasando de una concentración de 32.6%Vol a 23.6%Vol, lo cual corresponde a un factor de caída del 11%Vol, mientras que la Concentración de Dióxido de Carbono paso de 2.6%vol a 1.2%Vol, que corresponde a un factor de caída del 14%Vol. El sistema de bombeo fue reparado el día 19 del experimento, y a partir de este momento se observa la tendencia de recuperación de las concentraciones de Metano y Dióxido de Carbono. Para el día 22 del experimento, las concentraciones de Metano y Dióxido de Carbono registro valores de 35.1%Vol y 3.5%Vol respectivamente, es decir, que el sistema tardó 4 días en volver a adquirir las concentraciones de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> presentes en el momento de la falla de funcionamiento. Este fenómeno de restablecimiento concuerda con los resultados mostrados por H. Lindofer (2008), quien con sus estrategias de transición de temperatura en condiciones mesofílicas y termofílicas para evaluación del efecto en la producción de biogás, la producción de metano presenta un decremento considerable al realizar variación en la temperatura de operación de la digestión anaeróbica, pero dicha producción posteriormente tiende a restablecerse al valor presente antes de la realización de la variación de la temperatura de operación del proceso de digestión.

**FIGURA 18.** Aproximaciones lineales de las Concentraciones de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> del biogás.



Una vez las concentraciones de Metano y Dióxido de Carbono se normalizaron tras la avería en el sistema de bombeo, y el valor de temperatura fue restablecido al punto de operación de 35°C debido a la acción del controlador difuso basado en microcontrolador, durante el periodo de prueba correspondiente a los días 22 al 35 la tendencia de crecimiento en la Concentración de CH<sub>4</sub> aumento a 3.35%Vol/día, lo cual corresponde al doble con respecto a la tendencia de crecimiento presentado en el periodo de prueba comprendido entre los 16 primeros días del experimento, el cual fue de 1.682%Vol/día. De igual manera, la tendencia de crecimiento en la Concentración de CO<sub>2</sub> aumento a 0.264%Vol/día, considerándose aun este factor como un valor de crecimiento poco representativo o nulo debido a su magnitud.

**FIGURA 19.** Aproximaciones lineales de las Concentraciones de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> del biogás.



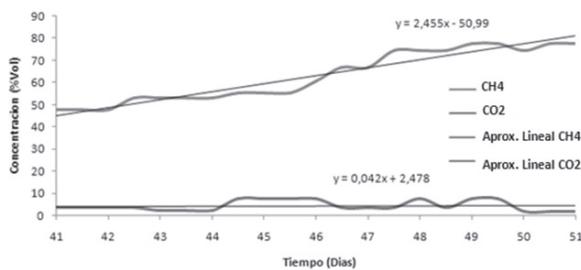
Para el día 36 del experimento, la magnitud de la concentración del CH<sub>4</sub> fue de 77%Vol, siendo este valor el máximo durante el proceso de reacción anaeróbica, y para la concentración de CO<sub>2</sub> se registro un valor de 1.9%Vol. Para este mismo día de experimento se presentó una falla de funcionamiento en el sensor de temperatura DS18S20, haciendo que nuevamente la Concentración de CH<sub>4</sub> decrementara de 77%Vol a 60.9%Vol, lo cual corresponde a un decremento del 16%Vol. Para la concentración de CO<sub>2</sub> el valor registrado fue de 1.9%Vol, lo cual no indica ninguna variación fuerte de la concentración de CO<sub>2</sub>. Dado que el reemplazo del sensor DS18S20 implicaba la apertura del reactor y por tanto la interrupción del proceso anaeróbico, se optó por utilizar el termistor incluido en el sensor de gas IR15TT-R para evitar la interrupción del proceso.

Una vez solucionado el problema de reemplazo del sensor sin afectar el funcionamiento de la reacción anaeróbica, se observó que para el día 37 del experimento, el nivel de concentración del CH<sub>4</sub> se restableció al valor que tenía antes de la falla, el cual correspondía a una concentración de 77%Vol. Este resultado concuerda nuevamente con lo expuesto por H. Lindofer (2008) con sus estrategias de transición de temperatura en

condiciones mesófilas y termófilas para evaluación del efecto en la producción de biogás, y coincide además con el resultado obtenido debido a la anterior falla de funcionamiento del sistema. Por otro lado, la concentración de CO<sub>2</sub> fue de 2.9%Vol, el cual sigue siendo un valor no acorde al nivel de concentración esperado.

Para el periodo de tiempo comprendido entre los días 37 al 41 del experimento, se observó un valor de estabilización del nivel de Concentración del CH<sub>4</sub> registrando un valor de 77%Vol, siendo este valor el máximo registrado durante el periodo de digestión anaeróbica. Para evaluar el efecto de la calidad del biogás generado una vez las concentraciones tanto de CH<sub>4</sub> como de CO<sub>2</sub> se estabilizaron, se realizó el cambio en el punto de operación de temperatura, cambiando el set point de 35oC a 40oC, recordando que el rango de operación seleccionado para la realización del experimento es el mesofílico.

**FIGURA 20.** Efecto de la variación de temperatura en las concentraciones de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>.



El resultado obtenido muestra que el valor de la Concentración del CH<sub>4</sub> decremente drásticamente pasando de 77%Vol a 47.8%Vol, lo que corresponde a un decremento del 30%Vol debido al cambio de temperatura en el proceso de digestión anaeróbica. Para el día 50 del experimento, el nivel de concentración de CH<sub>4</sub> volvió a tomar el valor de 77%Vol, es decir, que tomo 4 días en volver a adquirir la presente en el momento del cambio del punto de operación.

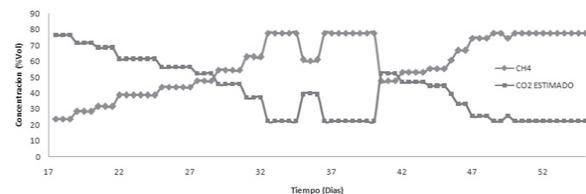
De acuerdo a lo referenciado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio del Gobierno de España en su revista "Biomasa - Digestores Anaerobios" (IDAE, 2007), la composición del producto gaseoso resultado de la digestión anaerobia puede estar comprendida entre 50-70% de CH<sub>4</sub>, 30-40% de CO<sub>2</sub> y  $\leq 5\%$  de H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y otros gases. Por tanto, se considera que la concentración de CH<sub>4</sub> resultado de la digestión anaeróbica de la Fracción de Residuos Sólidos Orgánicos utilizado para

el experimento se encuentra dentro del rango óptimo de producción. Por otro lado, se observa que el registro de Concentración de CO<sub>2</sub> presenta inconvenientes dado que no es un valor razonable dentro de los parámetros estándar de producción de CO<sub>2</sub> en el proceso de digestión anaeróbica.

Ahora, si la producción de Dióxido de Carbono es resultado principal del proceso de fermentación de Alcoholes, Ácidos Orgánicos y Ácidos Grasos Volátiles como lo muestra (IDAE, 2007), se puede asumir que la Concentración de CO<sub>2</sub> representativa del proceso de digestión anaeróbica comienza durante el proceso de Acetogénesis o finalización del proceso de acidogénesis. Se asume que dicho proceso inicia a partir del día 17 del experimento que es cuando se observa la estabilización del pH del sustrato. Según lo expuesto por (IDAE, 2007), si se considera un biogás formado exclusivamente por CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, se podría realizar una estimación de la Concentración del Dióxido de Carbono a partir de la Concentración de Metano.

$$\text{CO}_2 \text{ estimado } (\%) = 100 - \text{CH}_4 (\%) \quad \text{Ecuación 3}$$

**FIGURA 21.** Estimación de la Concentración de CO<sub>2</sub> a partir de la Concentración de CH<sub>4</sub>.



Este resultado es similar a lo mostrado por (P. Vindis, 2008) en su trabajo "Biogas production with the use of mini digester".

## 5. CONCLUSIONES

El diseño e implementación del controlador difuso basado en microcontrolador PIC18F452 de la familia microchip muestra una gran capacidad en la velocidad de respuesta, así como un bajo porcentaje de utilización de los recursos de memoria ROM para almacenamiento de programa (50%) y memoria RAM para datos (20%). Teniendo en cuenta que el algoritmo involucra procesamiento de datos de tipo flotante (float) y la

arquitectura de este microcontrolador no posee hardware especializado para el manejo de datos de tipo flotante, se muestra la eficiencia y viabilidad de implementar sistemas embebidos a partir de este tipo de dispositivos programables para la obtención de controladores en tiempo real, que indudablemente mejora el desempeño del sistema controlado y disminuye los costos de implementación del sistema de control.

La calidad del biogás generado en el proceso de digestión anaeróbica a partir de una fracción de residuos sólidos orgánicos provenientes de restaurante fue bueno, considerando que una concentración de 77%Vol de gas Metano es una concentración que para 1m<sup>3</sup> de biogás puede llegar a contener una capacidad calorífica equivalente a la proporcionada por 0.8L de gasolina. Algunos de los parámetros que se consideraron importantes durante el proceso para la obtención de este resultado fueron principalmente la variable de temperatura, la cual gracias al sistema de control difuso implementado siempre se mantuvo en el valor establecido, el valor de pH que siempre estuvo dentro del rango de operación recomendado de 6.5-7.5, el proceso de agitación con frecuencia de 2 veces/día con duración de 2 horas cada una, puesto que este proceso permitió mantener una distribución de temperatura uniforme dentro del reactor y una consistencia homogénea del sustrato y la inoculación del sustrato mediante una población bacteriana especializada llamada Septitrim para aumentar el proceso de degradación de la fracción orgánica de residuos sólidos.

El efecto de las variaciones de temperatura en los niveles de concentración de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> del biogás producido, mostro un efecto de disminución en sus magnitudes durante el transiente debido al cambio de temperatura, llegando a disminuir hasta en un 30% su magnitud con respecto a la concentración que tenia el biogás en el momento de registrarse el cambio del valor de la temperatura. Una vez estabilizado el nuevo valor de temperatura debido al cambio, el proceso de digestión anaeróbico comenzó a incrementar los valores de concentración de CH<sub>4</sub> y en un tiempo promedio de 3 días, el nivel de concentración de CH<sub>4</sub> restableció el nivel registrado en el momento de la variación de la temperatura. Por tanto se podría decir que las variaciones de temperatura posiblemente generan un proceso de inhibición en la actividad de la población bacteriana metanogénica disminuyendo los niveles de concentración de CH<sub>4</sub> principalmente, pero que tales concentraciones tienden a recuperarse una vez la temperatura dentro del reactor se estabiliza.

Los resultados mostrados por H. Lindorfer (2008) en su trabajo "New data on temperatura optimum and temperatura changes in energy crop digester", donde el

autor analiza los efectos de los cambios de temperatura en el proceso de digestión anaeróbica, muestran efectos negativos en la producción del metano. Estos resultados pueden ser tomados como referencia para validar los obtenidos en el presente proyecto de investigación, dada la similitud de las condiciones del experimento y además porque los efectos en la producción de biogás son similares a los obtenidos por Lindorfer (2008). Según H. Lindorfer (2008), sugiere que el cambio de temperatura en el reactor anaeróbico genera un cambio en la población bacteriana (datos no presentados) a la vez que las concentraciones de los Ácidos Grasos Volátiles decremento (datos presentados) siendo la concentración del Acido Propiónico el más afectado por la variación de temperatura.

## 6. REFERENCIAS

- [1] BOUALLAGI H. Effect of Temperature of the performance of an Anaerobic Tubular reactor treating fruit and vegetal waste. Process Biochemistry, Elsevier Science Ltda. 2003.
- [2] BOUSKOVA, A. Strategies for Changing Temperature from Mesophilic to Thermophilic conditions in Anaerobic CSTR reactors Treating Sewage Sludge. Water Research. Elsevier Science Ltda 2005.
- [3] CHARLES, W. Effect of Pre-Aeration and Inoculum on the Start-Up of Batch thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste. Bioresource Technology, Elsevier Science Ltda. 2008.
- [4] CONPES DOCUMENTO 3530. Lineamientos y Estrategias para Fortalecer el Servicio Público de Aseo en el Marco de la Gestión Integral de Residuos Sólidos. Consejo Nacional de Política Económica y Social. República de Colombia. Departamento Nacional de Planeación. 23 de Junio de 2008.
- [5] DAREIOTI, Margarita. Biogas Production from Anaerobic co-digestion of agroindustrial wastewater under thermophilic conditions in a two-stage process. Elsevier Science Ltda. 2009.
- [6] DS18S20 High Precision 1-Wire Digital Thermometer DataSheet. Dallas Semiconductor, 2008. Disponible en internet: <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/DS18S20.pdf>.
- [7] DUARTE, Oscar G. UNFUZZY: Fuzzy Logic System analysis, design, simulation and implementation software. 1998. Disponible en internet: [http://www.eusflat.org/publications/proceedings/EUSFLAT-ESTYLF\\_1999/papers/251-duarte-2.pdf](http://www.eusflat.org/publications/proceedings/EUSFLAT-ESTYLF_1999/papers/251-duarte-2.pdf).

- [8] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE. Biomasa: Digestores Anaerobios. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Gobierno de España. ISBN: 978-84-96680-21-0. Madrid Octubre de 2007.
- [9] FERNÁNDEZ, Alejandro y SANCHEZ, Mayra. Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos. Dirección Provincial de Servicios Comunes de la Ciudad de La Habana. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. 2007. Disponible en internet: [http://www.unido.org/fileadmin/import/72852\\_Gua\\_Gestin\\_Integral\\_de\\_RSU.pdf](http://www.unido.org/fileadmin/import/72852_Gua_Gestin_Integral_de_RSU.pdf).
- [10] FORSTER, T. The Effect of Temperature variations on the Performance of Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Filter Treating a Simulated Papermill Wastewater. Process Biochemistry, Elsevier Science Ltda 2002.
- [11] GUEVARA, Antonio. Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Anaeróbicos Rurales: Producción de Gas y Saneamiento de Efluentes. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima. 1996. Disponible en internet: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/031042/031042.pdf>.
- [12] HUZMEZAN, Mihai. Advanced Control of Batch Reactor Temperature. Proceedings of the American Conference. IEEE Xplore. 2002.
- [13] KANAGARAJ, N. An Embedded Fuzzy Controller for Real Time Pressure Control. IEEE Xplore. 2006.
- [14] KOMEMOTO, K. Effect of temperature on VFA's and biogas production in anaerobic solubilization of food waste, published by Elsevier Ltd, 2009.
- [15] KON KIM, Jung. Effects of Temperature and Hydraulic Retention Time on Anaerobic Digestion of Food Waste, Journal of Bioscience and Bioengineering, 2006.
- [16] LINDORFER, H. New data on temperature optimum and temperature changes in energy crop digesters, published by Elsevier Ltd, 2008.
- [17] MAN-CHANG, Wu. Influence of temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of municipal organic solid waste, Journal of Zhejiang University SCIENCE B, 2005.
- [18] MANDAL, T. Determination of the Quality of Biogas by Flame Temperature Measurement. Energy Conversion & Management, Elsevier Science Ltda. 1999.
- [19] Miniature Infrared Gas Sensor for Monitoring CO2 y CH4 up to 100% Vol. e2v Technologies. 2009. Disponible en internet: [http://www.e2v.com/assets/media/files/sensors\\_datasheets/IR/IR15TT-R.pdf](http://www.e2v.com/assets/media/files/sensors_datasheets/IR/IR15TT-R.pdf).
- [20] NGUYEN, Hung T. A First Course in Fuzzy and Neural Control. Editorial Chapman & Hall/CRC. Chapter 3: Fuzzy Logic for Control. Pág. 87-132. 2003.
- [21] Signal Processing for Infrared Gas Sensors. e2v Technologies. 2007. Disponible en internet: [http://www.e2v.com/assets/media/files/sensors\\_datasheets/IR/infrared\\_an2.pdf](http://www.e2v.com/assets/media/files/sensors_datasheets/IR/infrared_an2.pdf).
- [22] VAN LIER, Jules. Effect of Temperature on the Anaerobic Thermophilic conversion of Volatile Fatty Acids by Dispersed and Granular Sludge. Elsevier Science Ltda, 1995.
- [23] VINDIS, P. Biogas Production with the use of mini digester. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. Volume 28.