

**INSTRUMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR DE ESTIERCOL ANIMAL PARA  
ANALIZAR SU COMPORTAMIENTO DINÁMICO**

**CARLOS RODOLFO BERMÚDEZ GÓMEZ  
MIGUEL ANGEL DÍAZ HERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELETRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2010**

**INSTRUMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR DE ESTIERCOL ANIMAL PARA  
ANALIZAR SU COMPORTAMIENTO DINÁMICO**

**CARLOS RODOLFO BERMÚDEZ GÓMEZ  
MIGUEL ANGEL DÍAZ HERNÁNDEZ**

**Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico**

**Director**

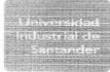
**Gabriel Ordóñez Plata**

**Codirector**

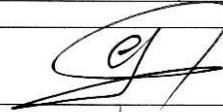
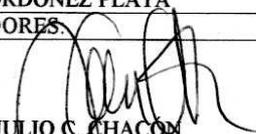
**Jorge Hernando Ramón Suárez**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELETRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2010**

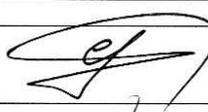
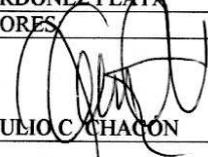


**NOTA DE PROYECTO DE GRADO**

NOMBRE DEL ESTUDIANTE <b>MIGUEL ANGEL DÍAZ HERNÁNDEZ</b>		CÓDIGO 2040506
TÍTULO DEL PROYECTO INSTRUMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR DE ESTIÉRCOL ANIMAL PARA ANALIZAR SU COMPORTAMIENTO DINÁMICO.		
REGISTRO No. 3014	FACULTAD: INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS	CARRERA: INGENIERÍA ELECTRÓNICA
CALIFICACIÓN: APROBADO		CRÉDITOS 8
DIRECTOR DE PROYECTO:		
NOMBRE: GABRIEL ORDOÑEZ PLATA		FIRMA: 
CALIFICADORES:		
 JULIO C. CHACÓN	 GERMÁN OSMA	FECHA AÑO MES DÍA 2010 05 14

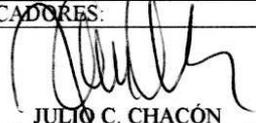


**NOTA DE PROYECTO DE GRADO**

NOMBRE DEL ESTUDIANTE <b>MIGUEL ANGEL DÍAZ HERNÁNDEZ</b>		CÓDIGO 2040506
TÍTULO DEL PROYECTO INSTRUMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR DE ESTIÉRCOL ANIMAL PARA ANALIZAR SU COMPORTAMIENTO DINÁMICO.		
REGISTRO No. 3014	FACULTAD: INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS	CARRERA: INGENIERÍA ELECTRÓNICA
CALIFICACIÓN: CUATRO PUNTO SEIS 4.6		CRÉDITOS 8
DIRECTOR DE PROYECTO:		
NOMBRE: GABRIEL ORDOÑEZ PLATA		FIRMA: 
CALIFICADORES:		
 JULIO C. CHACÓN	 GERMÁN OSMA	FECHA AÑO MES DÍA 2010 05 14

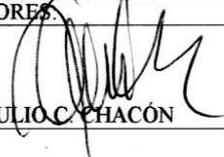
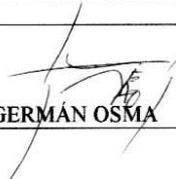


**NOTA DE PROYECTO DE GRADO**

NOMBRE DEL ESTUDIANTE <b>CARLOS RODOLFO BERMÚDEZ GÓMEZ</b>		CÓDIGO 2040541
TÍTULO DEL PROYECTO INSTRUMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR DE ESTIÉRCOL ANIMAL PARA ANALIZAR SU COMPORTAMIENTO DINÁMICO.		
REGISTRO No. 3014	FACULTAD: INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS	CARRERA: INGENIERÍA ELECTRÓNICA
CALIFICACIÓN: <b>APROBADO</b>		CRÉDITOS 8
DIRECTOR DE PROYECTO:		
NOMBRE: <b>GABRIEL ORDOÑEZ PLATA</b>		FIRMA: 
CALIFICADORES:		
 JULIO C. CHACÓN	 GERMÁN OSMA	FECHA AÑO MES DIA 2010 05 14



**NOTA DE PROYECTO DE GRADO**

NOMBRE DEL ESTUDIANTE <b>CARLOS RODOLFO BERMÚDEZ GÓMEZ</b>		CÓDIGO 2040541
TÍTULO DEL PROYECTO INSTRUMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR DE ESTIÉRCOL ANIMAL PARA ANALIZAR SU COMPORTAMIENTO DINÁMICO.		
REGISTRO No. 3014	FACULTAD: INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS	CARRERA: INGENIERÍA ELECTRÓNICA
CALIFICACIÓN: <b>APROBADO CUATRO PUNTO SEIS 4.6</b>		CRÉDITOS 8
DIRECTOR DE PROYECTO:		
NOMBRE: <b>GABRIEL ORDOÑEZ PLATA</b>		FIRMA: 
CALIFICADORES:		
 JULIO C. CHACÓN	 GERMÁN OSMA	FECHA AÑO MES DIA 2010 05 14



**ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO, TRABAJOS  
DE INVESTIGACION O TESIS Y AUTORIZACIÓN  
DE SU USO A FAVOR DE LA UIS**

Yo, **Carlos Rodolfo Bermúdez Gómez**, mayor de edad, vecino de Bucaramanga, identificado con la Cédula de Ciudadanía No. 1098629620 de Bucaramanga, actuando en nombre propio, en mi calidad de autor del trabajo de grado, del trabajo de investigación, o de la tesis denominada(o):

**Instrumentación de un Biodigestor de Estiércol Animal para Analizar su Comportamiento Dinámico**

hago entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos de ser el caso, en formato digital o electrónico (CD o DVD) y autorizo a LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del presente documento. PARÁGRAFO: La presente autorización se hace extensiva no sólo a las facultades y derechos de uso sobre la obra en formato o soporte material, sino también para formato virtual, electrónico, digital, óptico, uso en red, Internet, extranet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

EL AUTOR – ESTUDIANTE, manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y detenta la titularidad sobre la misma. PARÁGRAFO: En caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, EL AUTOR / ESTUDIANTE, asumirá toda la responsabilidad, y saldrá en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo valor y tenor, en Bucaramanga, a los Veinticinco (25) días del mes de Mayo de Dos Mil Diez 2010.

**EL AUTOR / ESTUDIANTE:**

**Carlos Rodolfo Bermúdez Gómez**



**ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO, TRABAJOS  
DE INVESTIGACION O TESIS Y AUTORIZACIÓN  
DE SU USO A FAVOR DE LA UIS**

Yo, **Miguel Ángel Díaz Hernández**, mayor de edad, vecino de Bucaramanga,  
identificado con la Cédula de Ciudadanía No. 1098634293 de Bucaramanga,  
actuando en nombre propio, en mi calidad de autor del trabajo de grado, del trabajo  
de investigación, o de la tesis denominada(o):

**Instrumentación de un Biodigestor de Estiércol Animal para Analizar su  
Comportamiento Dinámico**

hago entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos de ser el caso, en formato digital  
o electrónico (CD o DVD) y autorizo a LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE  
SANTANDER, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de  
1993, decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales  
sobre la materia, útiles y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de  
reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo  
público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del  
presente documento. **PARÁGRAFO:** La presente autorización se hace extensiva no  
sólo a las facultades y derechos de uso sobre la obra en formato o soporte material,  
sino también para formato virtual, electrónico, digital, óptico, uso en red, Internet,  
extranet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

**EL AUTOR – ESTUDIANTE**, manifiesta que la obra objeto de la presente autorización  
es original y la realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la  
obra es de su exclusiva autoría y detenta la titularidad sobre la misma. **PARÁGRAFO:**  
En caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en  
cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, **EL AUTOR / ESTUDIANTE**,  
asumirá toda la responsabilidad, y saldrá en defensa de los derechos aquí autorizados;  
para todos los efectos la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo  
valor y tenor, en Bucaramanga, a los Veinticinco (25) días del mes de Mayo  
de Dos Mil Diez 2010

**EL AUTOR / ESTUDIANTE:**

  
**Miguel Ángel Díaz Hernández**

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1 ESTADO DEL ARTE	15
2 INSTRUMENTACION DEL BIODIGESTOR	16
2.1 BIODIGESTOR	17
2.2 SENSORES	18
2.2.1 Sensor de temperatura	18
2.2.2 Sensor de presión	20
2.2.3 Sensor del nivel de pH	21
2.3 CONTROL DE TEMPERATURA	23
2.3.1 Contactor	23
2.3.2 Controlador de temperatura	24
2.3.3 Funcionamiento del sistema de control de temperatura	24
2.4 ADQUISICIÓN DE DATOS	26
2.5 PROGRAMA DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	26
2.5.1 Tabulación de datos	28
2.5.2 Gráficas	28
2.5.3 Análisis estadísticos	29

2.6	DIAGRAMA P&ID	29
3	ANÁLISIS DE DATOS	30
3.1	MODELOS MATEMÁTICOS	30
3.1.1	Ecuación de Arrhenius	30
3.1.2	Modelo exponencial	31
3.2	RESULTADOS EXPERIMENTALES	34
4	CONCLUSIONES	41
5	RECOMENDACIONES	43
	BIBLIOGRAFÍA	44

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1 Comparación de sensores de temperatura	19

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 Diagrama de bloques del sistema de monitorización del biodigestor	17
Figura 2 Biodigestor	18
Figura 3 Transmisor de presión	21
Figura 4 Medidor digital de pH	32
Figura 5 Esquema del sistema de control de temperatura	25
Figura 6 Data Logger HOBO U12-006, de 4 canales	26
Figura 7 Software HOBOWare Pro	27
Figura 8 Selección de la variable que se desea graficar	28
Figura 9 Diagrama P&ID	29
Figura 10 Producción de gas a diferentes temperaturas.	32
Figura 11 Resultados experimentales de las curvas de presión a diferentes temperaturas	35
Figura 12 Modelos a partir de los datos experimentales	37
Figura 13 Comparación del modelo teórico con los datos experimentales	38
Figura 14 Curvas de pH vs días transcurridos	40

**Título:** Instrumentación de un biodigestor de estiércol animal para analizar su comportamiento dinámico\*

**Autores:** Carlos Rodolfo Bermúdez Gómez, Miguel Ángel Díaz Hernandez\*\*

**Palabras clave:** Biodigestor, estiércol, sensor, sistema de control, temperatura, presión, pH

**Contenido:**

En diferentes partes del mundo las personas han llevado a cabo investigaciones relacionadas con la el comportamiento dinámico de biodigestores, proponiendo modelos matemáticos que representan el comportamiento dinámico de biogás en función de diferentes compuestos químicos y los fenómenos físicos presentes en la bio-digestión del estiércol. En esta investigación, el modelo matemático que se está analizando permite que el volumen de gas se represente en función de la temperatura y presión, ya que estas variables afectan el comportamiento de otras variables que hacen parte composición de la biomasa, como el nivel de pH.

El objetivo principal de este proyecto es la implementación de un biodigestor utilizado en la producción de gas metano basado en el estudio de la temperatura, presión y el nivel de pH del sustrato. Durante la investigación se analizó el proceso de producción de gas generado por estiércol de cerdo a diversas temperaturas dentro del rango mesofílico.

El tablero de control fue construido con un datalogger para almacenar las variables, un relé Telemecanique para activar la resistencia de calor, un controlador de temperatura Autonics, un sensor de presión, un sensor de temperatura, una fuente de 24 voltios para el sensor de presión y dos protecciones de potencia, una para el sistema de control y otra para el sistema eléctrico.

La función de todo el sistema es calentar el tanque del biodigestor para brindarle a las bacterias anaerobias las mejores condiciones para la producción de gas metano y así luego se midan las variables de presión, temperatura y pH, para establecer el modelo matemático de cantidad de volumen con respecto de la temperatura.

---

\*Proyecto de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. Director Dr. Gabriel Ordoñez Plata. Codirector Jorge Hernando Ramón Suarez.

**Title:** Instrumentation of an animal manure biodigester to analyze its dynamic behavior\*

**Authors:** Carlos Rodolfo Bermudez Gómez, Miguel Angel Díaz Hernandez\*\*

**Key words:** Biodigester, manure, sensor, control system, temperatura, pressure, pH.

**Content:**

In different parts of the world people have conducted research related to the dynamic behavior of bio-digesters by proposing mathematical models that represent the dynamic behavior of biogas as a function of different chemical compounds and physical phenomena present in the bio-digestion process. In this research, the mathematical model that is being analyzed is the one that allows the volume of gas in terms of temperature and pressure; these variables affect the behavior of other variables that affect the composition of the biomass, such as level of pH.

The main objective of this project is the implementation of a biodigester used in the production of methane gas based on temperature, pressure and the pH level of substrate. During the investigation we analyzed the biogas production process swine manure generated at various temperatures within the mesophilic range.

The control panel was build with a datalogger for store the variables, a Telemecanique relay for active the heat resistance, an Autonics temperature controller, a pressure sensor, a temperature sensor, a 24 volts power source for the pressure sensor and two power protections, one for the control system and the other one for the power system.

The function of all the system is to heat the biodigesters tank for bring to the anaerobic bacteria the best condition for the methane production. Then the methane pressure, the manure temperature and the manure pH are sensed for check these curves and stablish the mathematical model.

---

\*Degree work

\*\*Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electric, Electronic and telecommunications.  
Project Director Dr. Gabriel Ordoñez Plata. Project Codirector Jorge Hernando Ramón Suarez.

## INTRODUCCIÓN

Un biodigestor está constituido principalmente por: un contenedor principal dentro del cual se depositan los desechos orgánicos, los cuales pueden ser de animales o vegetales. También posee un tanque de carga por el cual ingresa la materia orgánica (afluente) que será utilizada para la biodigestión; un tanque de descarga por el cual sale el sustrato fermentado (efluente) que puede ser utilizado como abono orgánico; tuberías por las cuales se conduce el gas; válvulas de seguridad y un depósito de gas (en algunas situaciones está dentro del mismo contenedor principal, esto depende del tipo de biodigestor).

El proceso de producción de biogás se inicia llenando el contenedor principal con los desechos orgánicos mezclados con agua generalmente en una proporción 4:1 (4 de agua por 1 de material orgánico) y llenando el contenedor hasta el 75% de su capacidad, de tal forma que el espacio vacío sirva como reservorio de gas. Una vez se ha llenado el biodigestor, inicia un proceso de descomposición química y bacteriana, el cual se ve reflejado en la producción de burbujas, las cuales contienen el gas [2], este gas se va acumulando a medida que pasa el tiempo hasta llegar a un punto máximo de producción que depende de la cantidad de alimento bacteriano presente en la biomasa. Este proceso requiere de varias semanas o meses, dependiendo de las condiciones de operación que hayan presentes en el medio.

Al aumentar la temperatura se logra disminuir el tiempo de retención y por lo tanto se obtiene una producción de biogás en menor tiempo. La actividad biológica y por lo tanto la producción de gas aumenta con la temperatura. Al mismo tiempo se deberá tener en cuenta que al no generar calor el proceso la temperatura deberá ser lograda y mantenida mediante energía exterior. El cuidado en el mantenimiento también debe extremarse a medida que se aumenta la

temperatura, dada la mayor sensibilidad que presentan las bacterias termofílicas a las pequeñas variaciones térmicas [7]. Por tal razón los biodigestores que trabajan a altas temperaturas con fuentes de energía externas, requieren sistemas de control de temperatura. Los biodigestores artesanales no requieren este tipo de controles ya que ellos trabajan a la temperatura ambiente y por lo tanto las bacterias que predominan no son tan sensibles a la temperatura.

La optimización del proceso realizado en el biodigestor es importante para lograr una adecuada eficiencia en la generación del gas metano, por tal razón en este trabajo de grado se realiza la instrumentación necesaria para estimar las magnitudes de temperatura, presión y pH del biodigestor. Se han seleccionado estas variables ya que la rapidez en la generación del biogás depende de la temperatura; adicionalmente, la presión depende del volumen de gas generado y el pH es un indicador del adecuado funcionamiento del proceso biológico, para garantizar la vida de las bacterias.

En este documento inicialmente se presenta un estado del arte que permitió establecer las variables que se deberían monitorizar, posteriormente se describe el diseño e implementación de la instrumentación del biodigestor y así finalizar con el análisis de las variables del proceso y las conclusiones más relevantes de este trabajo.

## 1. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se hace una síntesis de investigaciones previas que han sido base del trabajo desarrollado.

La Universidad Nacional del Nordeste en Argentina [23] realizó una investigación enfocada en la obtención de un modelo matemático que describiera el proceso de la obtención de gas metano en biodigestores con diferentes tipos de excretas animales y residuos agrícolas y fue realizada en el *Institute of technology and Biosystems Engineering -- Germany*. Como resultado obtuvieron una expresión matemática exponencial del comportamiento del volumen de metano con respecto al tiempo la cual presenta un error no mayor al 10% en comparación con los resultados experimentales.

Otra investigación realizada en la ciudad de Abasolo, México [21] presenta la implementación de un biodigestor para la generación de energía eléctrica a partir de lodos activados, producto del sistema de tratamiento de aguas residuales. En esta investigación se analiza el comportamiento de la producción de biogás a diferentes temperaturas y en ella comprueban que al aumentar las temperaturas a un rango entre 303.15 K y 309.15 K se puede disminuir el tiempo de retención de la biomasa hasta en 22 días aumentando así la eficiencia en la generación del biogás. También establecieron que el inicio de producción del gas está entre el tercero y quinto día de iniciarse el proceso en el biodigestor.

En México también, la Universidad de Guanajuato [14], utilizó el estiércol de cabra y realizó el análisis de comportamiento de la producción de metano a una temperatura de 308.15 K, en ella establece que la producción de biogás inicia desde el primer día de digestión anaerobia y que inicialmente se presentó un nivel de pH igual a 6,4 y después se mantuvo en un valor de 7.

Cambiando de país, en la Universidad Industrial de Santander, Colombia, se ejecutó un proyecto con un biodigestor de laboratorios tecnificado por medio de un sistema de control de temperatura y pH en tiempo real, con una interfaz gráfica para realizar la monitorización, almacenamiento y control de variables [15]. Los resultados permitieron seleccionar sustratos específicos como el estiércol de cerdo para futuras investigaciones y montajes de laboratorio.

El resultado de estos trabajos muestra que la producción de biogás presenta un comportamiento exponencial creciente, el cual se estabiliza en un valor máximo y este valor se puede lograr en un menor tiempo aumentando la temperatura del proceso.

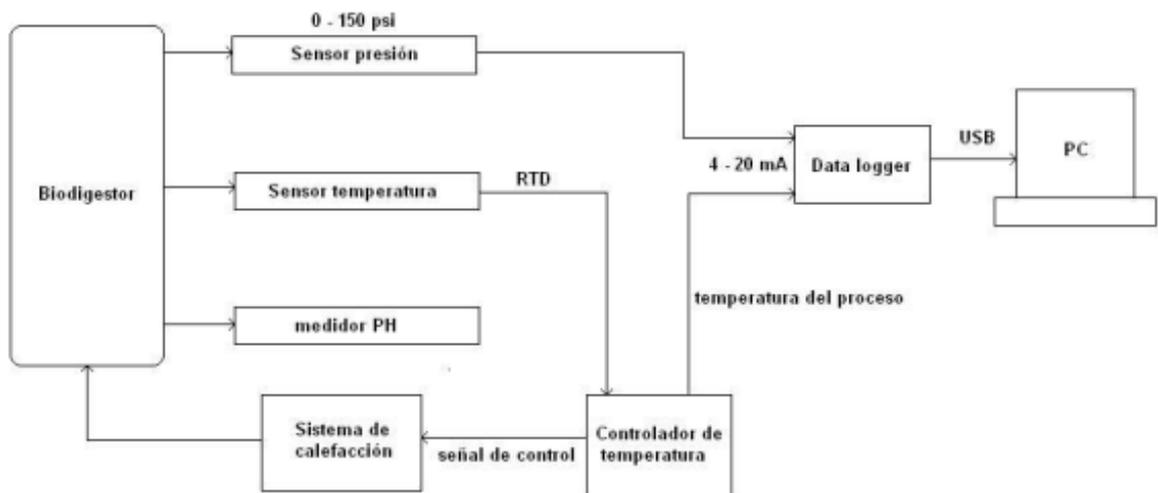
## **2. INSTRUMENTACIÓN DEL BIODIGESTOR**

La instrumentación del biodigestor permite analizar la dinámica de su comportamiento con relación a la temperatura del proceso, con el propósito de realizar un modelo matemático del incremento de la presión del gas dentro del biodigestor. La caracterización del comportamiento de la presión se puede realizar debido a que el biodigestor utilizado es de flujo discontinuo, es decir, que se utiliza un tanque de estructura sólida, el cual no permite que se expanda el depósito de gas como ocurre con los biodigestores de domo flexible. Otro parámetro importante, que se requiere analizar es el nivel de pH de los desechos orgánicos durante todo su proceso de biodigestión. Estas mediciones se realizan manteniendo la temperatura constante

El diagrama de bloques que representa el sistema de adquisición de datos del biodigestor se muestra en la Figura 1. En él se muestran: los sensores de temperatura, presión y nivel de pH, el sistema de calefacción con su sistema de

control, el sistema de adquisición de datos y el computador donde se procesan los datos adquiridos.

Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de monitorización del biodigestor



Fuente: Autores.

## 2.1 BIODIGESTOR

El tanque de almacenamiento utilizado como biodigestor (ver Figura 2), es un recipiente empleado para el almacenamiento de refrescos. Este tanque es de acero inoxidable y tiene una capacidad de 19 litros y soporta una presión de 896318,6813 Pa.

Al biodigestor se le instalaron un sensor de presión y otro de temperatura RTD en la parte superior; adicionalmente, para obtener el nivel de pH se instaló una válvula de salida de líquido en la parte inferior del tanque.

Este tanque se seleccionó dado a que se diseñó para el almacenamiento de bebidas gaseosas, lo cual asegura que no se presente pérdidas de presión durante la biodigestión y adicionalmente sus dimensiones son adecuadas para

realizar el análisis del comportamiento dinámico de un biodigestor a escala para realizar pruebas en un laboratorio como se hace en la mayoría de las investigaciones que se realizan en el mundo sobre esta temática.

Figura 2. Biodigestor



Fuente: Autores.

## 2.2 SENSORES

Para monitorizar las variables del proceso, se utilizan tres sensores: Sensor de temperatura, sensor de presión, sensor de pH

**2.2.1 Sensor de temperatura.** La temperatura del proceso es la variable que impacta más en el biodigestor, ya que su valor incide en el tiempo de producción de biogás. Existen varios tipos de sensores de temperatura (ver tabla 1), por tal razón se debe realizar una correcta selección dependiendo de los requerimientos de la aplicación. Las características a tener en cuenta para realizar su selección son: la exactitud, la linealidad, el precio y la precisión.

Tabla 1. Comparación de sensores de temperatura [12].

<b>Tipo de sensor</b>	<b>Rango (°K)</b>	<b>Costo</b>	<b>Linealidad</b>	<b>Características</b>
Termómetros	203.15 a 773.15	Bajo	Buena	Baja precisión, lentos
RTD	123.15 a 873.15	Medio	Alta	Alta Exactitud y precisión
Termocuplas	3.15 a 3273.1	Medio	Baja	Respuesta rápida, altas temperaturas
Pirómetros de radiación	223.15 a 2473.1	Alto	Baja	Alta sensibilidad
Termistores	223.15 a 573.15	Medio	Baja	Alta velocidad, Alta sensibilidad

Fuente: Autores.

Finalmente después de analizar las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de sensores de temperatura, se seleccionó un detector de temperatura resistivo (RTD). Las RTDs pueden ser fabricadas de níquel, cobre o platino; sin embargo, el material más utilizado por sus características de comportamiento lineal es el platino [12]. Estas RTDs son conocidas como PT100.

El sensor utilizado en este proyecto es una PT100 de bulbo recto con conexión de 3 hilos, marca Autonics y referencia TWRPT, la cual tiene un rango de medición entre 273.15 °K y 673.15 °K. Utilizando diferentes temperaturas en el interior de un recipiente con agua, se verificó que la resistencia de salida de la PT100 coincidiera con los valores dados por el fabricante y al mismo tiempo se comprobó que el valor mostrado por el controlador de temperatura también coincidiera con dichos valores de temperatura.

**2.2.2 Sensor de presión.** La presión del proceso es la variable utilizada para caracterizar el comportamiento dinámico de la producción de biogás, ya que a medida que se realiza la biodigestión de los desechos orgánicos, se va acumulando gas dentro de la cavidad vacía que se encuentra en el biodigestor. El espacio utilizado para el almacenamiento de gas equivale al 25% del volumen total del biodigestor y el 75% restante corresponde a la biomasa. Debido a que el biodigestor utilizado es de flujo discontinuo y de estructura rígida, el gas no puede expandirse y por lo tanto la presión irá aumentando a medida que se produce el gas, por tal razón se puede obtener un análisis del volumen de producción de biogás a partir del aumento de presión en el interior del biodigestor.

En este caso se utiliza un transmisor de presión que se encuentra dentro de la clasificación de los sensores electromecánicos y electrónicos, ya que para el análisis del comportamiento dinámico del biodigestor es necesario obtener una señal de tensión que permita el almacenamiento de datos en formato digital para su posterior análisis.

El transmisor de presión utilizado es de la marca ZHYQ con referencia PT124B-210 (ver Figura 3). Este sensor tiene un rango de medición de 0- 1034213,863 Pa y una señal de salida de 4-20 mA. Se alimenta con una fuente de tensión de 12-24 Vdc y el elemento de sensado es un cerámico piezoresistivo, que varía su resistividad frente a deformaciones mecánicas causadas por la variación de presión.

La medida de presión que realiza el sensor es de tipo manométrica o “pressure gauge”; es decir que el valor de presión está referenciado a la presión atmosférica, por tal razón el valor medido es igual a la presión total del medio menos la presión atmosférica que en Bucaramanga es de 101352 Pa aproximadamente.

Figura 3. Transmisor de presión.



Al sensor de presión se le realizó una caracterización de la señal, utilizando un manómetro calibrado y sometiéndolo a diferentes valores de presión de aire para analizar la señal de salida del sensor. Para esto se utilizó una resistencia de  $255 \Omega$  y un amplificador operacional MCP601 conectado como un seguidor de tensión (*Buffer*) para obtener el valor de la tensión en la resistencia y así conocer la corriente que circula por el sensor dependiendo de la presión del medio.

La relación P-I (presión vs corriente) es lineal e idealmente tendría una pendiente igual a  $253483,7494 \text{ [Pa/mA]}$  para este caso ya que  $4 \text{ mA}$  equivalen a  $0 \text{ Pa}$  y  $20 \text{ mA}$  equivalen  $1034213,863 \text{ Pa}$ . Después de obtener la caracterización del sensor se encontró que la pendiente es igual a  $252611,5624 \text{ [Pa/mA]}$ , comprobando así el correcto funcionamiento del sensor.

**2.2.3. Sensor del nivel de pH.** El nivel de pH del sustrato es otra variable importante en el proceso de biodigestión, ya que un comportamiento anormal en los valores de pH es una advertencia de que el proceso biológico presenta alguna alteración a nivel bacteriano. Un valor de esta variables es alrededor de  $7,0$  tal

como se ha demostrado en la mayoría de investigaciones [11][7], lo cual significa que el sustrato tiene una concentración neutra, que en su fase inicial (ácida) puede tener niveles de pH de 6 o menores y a medida que se aumenta la producción de gas metano va elevando el nivel de pH hasta un nivel en el rango de 7 y 8 [14]. Si el nivel de pH se mantiene dentro de estos valores, indica que el biodigestor esta funcionando adecuadamente; en caso contrario, como se indica en [2], *“si el PH se torna acido, la acción de las bacterias metanogénicas (\*) se inhibe y aumenta la proporción de gas carbónico en el biogás”*.

Para la medición del nivel de pH se utiliza un medidor digital marca *Qingdao* de referencia pH-009(I), con un rango medida entre 0,0 – 14,0 pH y una resolución de 0,1 pH (ver Figura 4). El medidor de pH fue calibrado utilizando una solución amortiguadora de pH 4,00 a 298.15 K y una solución amortiguadora de pH 6,86 a 298.15 K.

Figura 4. Medidor digital de pH



Fuente: Hoja de datos del sensor.

---

(\*) “Las bacterias metanogénicas son bacterias que obtienen su energía a través de la producción metabólica de gas metano, a partir del dióxido de carbono y del hidrógeno. La mayoría son anaerobias, es decir, que viven en ausencia de oxígeno”. [1]

## 2.3 CONTROL DE TEMPERATURA

La temperatura ambiente del laboratorio donde se encuentra el biodigestor es aproximadamente 298.15°K y la temperatura a la cual debe mantenerse el sustrato en el biodigestor está en un rango de 303.15 °K a 313.15°C, para obtener una mayor eficiencia de las bacterias mesofílicas (\*\*), por tal razón es necesario implementar un control de temperatura del proceso.

Para realizar este control, se utiliza un sistema conformado por una RTD tipo PT100, un sistema de calefacción del agua de tipo resistivo de potencia nominal 1500 W, un contactor para energizar el sistema de calefacción, una motobomba de potencia nominal 40 W con capacidad de 2,5 metros de altura, para hacer circular agua caliente a través de una serpentina de cobre que envuelve el biodigestor y de esta forma mantener la temperatura del proceso. Para lograr esta temperatura se debe realizar un incremento lento de la misma, para evitar cambios bruscos en el sustrato que pueden afectar a las bacterias y de esta forma no alterar su comportamiento biológico que como se mencionó anteriormente, afecta la producción de biogás.

**2.3.1 Contactor.** El contactor utilizado para energizar la resistencia del sistema de calefacción es de la marca Telemecanique de referencia LC1D09, con una capacidad de corriente de 25 A y una bobina de control con valor nominal de tensión de 110 V. Este contactor es activado por el controlador de temperatura.

---

(\*\*) Las bacterias mesofílicas son aquellas que predominan a temperaturas entre 293.15 °K y 313.15 °K y presentan una sensibilidad de  $\pm 1$  °K/hora

**2.3.2 Controlador de temperatura.** Se seleccionó un controlador industrial de temperatura marca Autonics de referencia TZ4ST-R4R, el cual reconoce diferentes tipos de sensores de temperatura como termocuplas, RTDs y sensores cuya señal de salida sea un tensión de 1-5 Vdc, 0-10Vdc o una corriente de 4-20 mA, que por lo consiguiente reconoce la RTD tipo PT100 que se seleccionó para sensar la temperatura del proceso. Este controlador tiene una salida de relé para realizar el control, otra salida de relé para activar una señal de alarma y además tiene una salida de transmisión de datos, la cual permite conocer el valor de la temperatura del proceso.

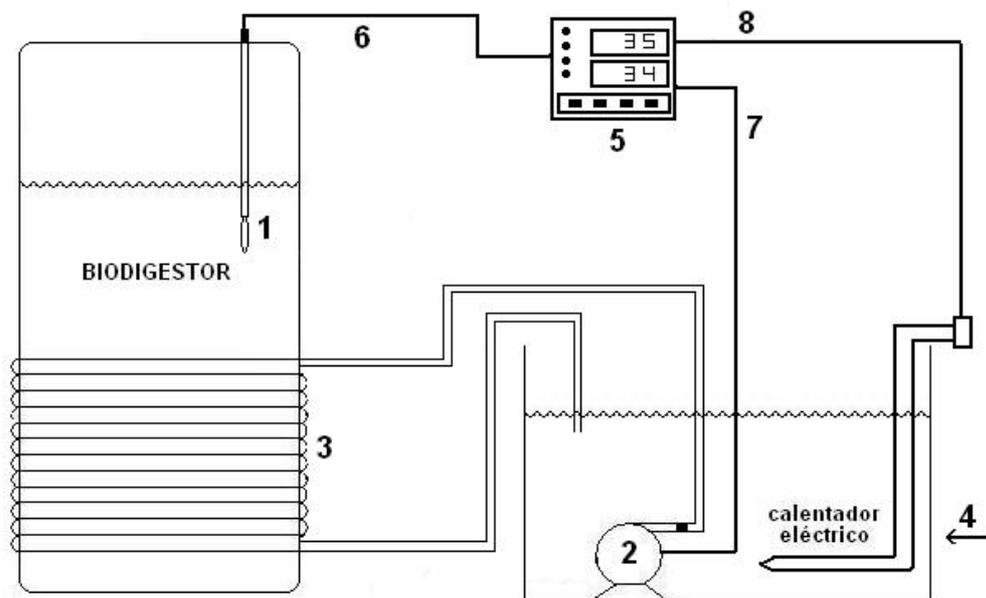
**2.3.3 Funcionamiento del sistema de control de temperatura.** El control del proceso de temperatura es un lazo cerrado que está continuamente sensando la señal de salida deseada, que en este caso es la temperatura. Para llevar a cabo este lazo de control, se ha instalado la RTD tipo PT100 para que esté en contacto directo con la biomasa dentro del biodigestor. El tipo de control utilizado es un control proporcional (P), ya que es un proceso lento y no requiere respuestas rápidas en los actuadores, además se permite tener un margen de error a la salida con respecto al valor de referencia, por lo cual no se consideró necesario usar una constante integral (I).

El controlador de temperatura adquiere la señal de la PT100 y procesa la información para generar la acción de control correspondiente a través de la salida a relé que controla la bomba de agua y de esta forma hace circular el agua caliente que se encuentra almacenada en un recipiente metálico a través de una serpentina de cobre que se encuentra en la cara externa del biodigestor, la cual permite la transferencia de calor entre el agua caliente y el interior del biodigestor.

En la Figura 5 se muestra el esquema de control de temperatura.

El agua debe tener una temperatura mínima para lograr la temperatura adecuada dentro del biodigestor y se controla a través de una señal de alarma que tiene el controlador. Esta señal de alarma se configuró de tal forma que cuando la temperatura del proceso esté  $0,5^{\circ}\text{K}$  por debajo del *set point*, ( $307.15^{\circ}\text{K}$ ,  $311.15^{\circ}\text{K}$ ,  $313.15^{\circ}\text{K}$  según el caso) se active y accione el controlador que a su vez energiza la resistencia del sistema de calefacción del agua; una vez la temperatura del proceso se encuentre en el valor del *set point*, nuevamente se desactiva la alarma y por tanto se des-energiza la resistencia. El agua caliente es bombeada a través de la serpentina de cobre y retorna al depósito de agua principal, de tal forma que esté recirculando continuamente dependiendo de la señal de control.

Figura 5. Esquema del sistema de control de temperatura



- |                      |                                     |
|----------------------|-------------------------------------|
| 1. RTD               | 5. Controlador de temperatura       |
| 2. Bomba de agua     | 6. Señal de entrada                 |
| 3. Manguera de cobre | 7. Señal de control                 |
| 4. Deposito de agua  | 8. Señal de control mediante alarma |

Fuente: Autores.

## 2.4 ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos se realiza por medio de un “Data Logger” de la marca “HOBO”, de referencia U12-006 de con 4 entradas y una capacidad de almacenamiento de 43000 datos con un rango de tiempo de muestreo que va desde un segundo hasta 18 horas y con una resolución de 12 bits (ver Figura 6).

Figura 6. Data Logger HOBO U12-006, de 4 canales



Fuente: [www.microdaq.com](http://www.microdaq.com)

La adquisición de las muestras de temperatura y presión se realiza mediante una señal de 4-20mA. El cable utilizado para la adquisición de datos por medio de la señal de 4-20mA, tiene una precisión de  $\pm 0,02$  mA ó  $\pm 2,5\%$  de la lectura y una resolución de 0,03% de la escala completa.

## 2.5 PROGRAMA DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

El programa requerido para el análisis de los datos, lo provee el fabricante del Data Logger; el nombre de este programa es “*HOBOware Pro*” y la comunicación de datos se realiza a través de un canal USB.

Este programa permite realizar la lectura de los datos almacenados en el Data Logger en tiempo real, o simplemente descargar los datos en cualquier instante de tiempo que el usuario lo requiera sin necesidad de detener el proceso de adquisición. La Figura 7 muestra la pantalla de inicio del programa.

Figura 7. Software HOBOWare Pro



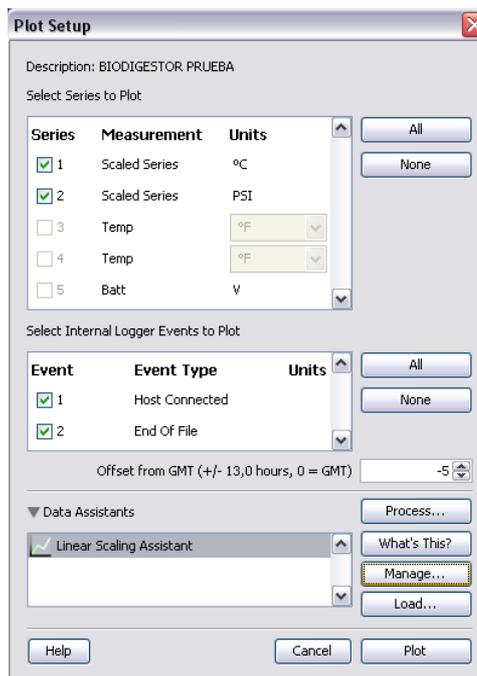
Fuente: Autores

Cuando hay que realizar la lectura de datos después de un determinado tiempo, el software muestra una ventana en la cual se selecciona cual de las variables se desea observar mediante una grafica en función del tiempo, tal como se muestra en la Figura 8.

Después de seleccionar las variables que se van a analizar, aparece una interfaz grafica que permite observar la curva con el comportamiento de la variable en función de tiempo. En el eje X se muestra la fecha y hora del registro de cada dato y en el eje Y es registrado el valor de la magnitud de la variable en las unidades establecidas en la programación del Data Logger.

**2.5.1 Tabulación de datos.** A medida que el Data Logger va registrando los datos de acuerdo con el periodo de muestreo establecido en la configuración inicial, se obtiene información de la fecha y hora de la muestra con su respectivo valor, ya sea en unidades de presión (Pa) o de temperatura (°K) según el caso.

Figura 8. Selección de la variable que se desea graficar



Fuente: Autores.

Adicionalmente estos datos pueden ser exportados al programa Excel si se requiere realizar algún otro tipo de análisis adicional que no este disponible en el software "HOBOWare Pro"

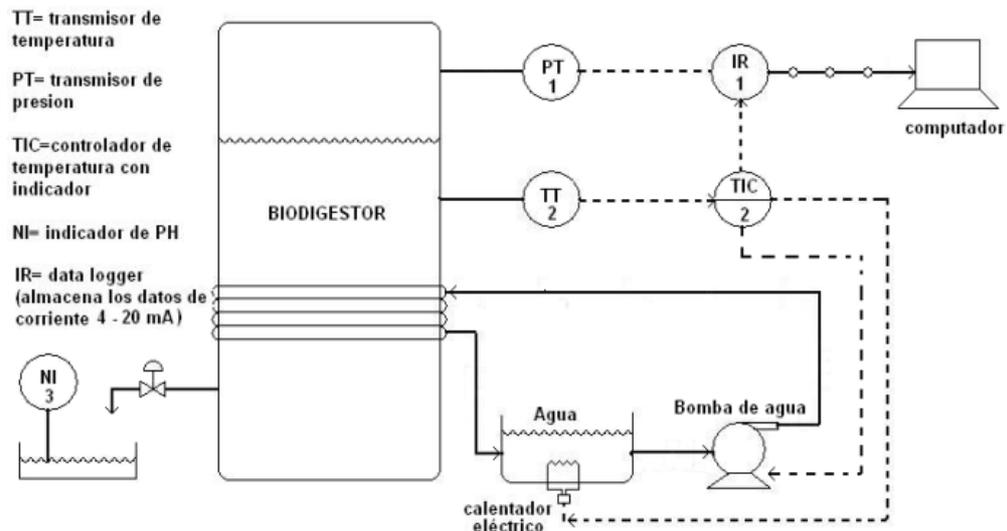
**2.5.2 Gráficas.** Las gráficas permiten observar el comportamiento de las variables en el tiempo. A medida que hay un mayor número de gráficas (máximo 4 para el Data Logger U12-006), éstas se muestran de diferentes colores para una mejor identificación.

**2.5.3 Análisis estadísticos.** Este análisis de la información permite obtener cifras estadísticas de los datos adquiridos tales como: número de muestras adquiridas, valor máximo, valor mínimo y valor promedio de los datos, desviación estándar, fecha y hora de la primera y última muestra adquirida entre otros. Adicionalmente se obtiene información relacionada con el Data Logger como su configuración, el nivel de carga de la batería entre otros.

## 2.6 DIAGRAMA P&ID.

El diagrama P&ID, permite comprender el funcionamiento del sistema mediante un diagrama de flujo que muestra la forma como están interconectados el controlador, los instrumentos de medición, los indicadores y los actuadores. El diagrama permite ver el tipo de señal que hay entre cada uno de los dispositivos que conforman el sistema, ya que existen diferentes formas de procesamiento de señales, por ejemplo la conexión entre el Data Logger y el computador es una señal digital (ver Figura 9), otra es la señal entre el controlador de temperatura y los actuadores y finalmente las señales físicas entre el biodigestor y los sensores.

Figura 9. Diagrama P&ID



Fuente: Autores.

### 3. ANALISIS DE DATOS

En diferentes partes del mundo han realizado investigaciones relacionadas con el comportamiento dinámico de los biodigestores, cada una de ellas con un enfoque diferente, en cuanto al fenómeno biológico que analizado. Por esta razón existen diferentes modelos matemáticos que representan el comportamiento dinámico del biogás en función de los diferentes compuestos químicos y fenómenos físicos presentes en el proceso de biodigestión.

Con relación a este trabajo de grado, el modelo matemático analizado es el que permite representar el volumen del gas en función de las variables presión y temperatura que afectan el comportamiento de otras variables que inciden en la composición de la biomasa como el nivel de pH.

#### 3.1 MODELOS MATEMÁTICOS

El modelo matemático utilizado en este trabajo se obtuvo después de analizar diferentes modelos y teorías planteadas por varios autores, entre las que se destaca la teoría de *Arrhenius* [6], y los trabajos de Noemí Sogari en la Universidad Nacional del Nordeste en Argentina [23] y el trabajo de grado realizado en la Universidad Industrial de Santander por Guillermo Martínez y Carolina Rodríguez de la escuela de Ingeniería Química [15].

**3.1.1 Ecuación de Arrhenius:** El modelo de *Arrhenius* [6] está basado en la dinámica de las reacciones químicas considerando el efecto de la temperatura. Este modelo establece que la constante de velocidad de la generación de un gas en una reacción química depende de: la temperatura del compuesto, la energía de activación del mismo y de la constante universal de los gases (ver Ecuación (1)).

La energía de activación, es la energía mínima necesaria o la barrera que deben romper las moléculas para que haya reacción química.

$$K = A \cdot e^{-E_a/RT}. \quad (1)$$

Donde:

K = Constante de velocidad.

A = Constante.

$E_a$  = Energía de activación. [J/mol]

R = Constante universal de los gases. [J/mol. K]

T = Temperatura. [K]

El valor de la constante universal de los gases es:

$$R = 8,314472 \text{ [J/mol. K]}$$

**3.1.2 Modelo exponencial.** Estudios de la dinámica de la acumulación de gas dentro de un biodigestor han establecido que su comportamiento puede ser modelado exponencialmente, ya que ésta va creciendo y se estabiliza en un punto de máxima de producción.

La referencia [23] establece que la producción de gas tiene un límite y depende fundamentalmente de la naturaleza de la materia dispuesta en el sistema digestor y proponen la siguiente ecuación para estimar la máxima generación de gas para un producto determinado:

$$M_{\max} = \frac{V_{\text{gas}}}{S_{\text{org,total}}} \quad [\text{L/Kg}] \quad (2)$$

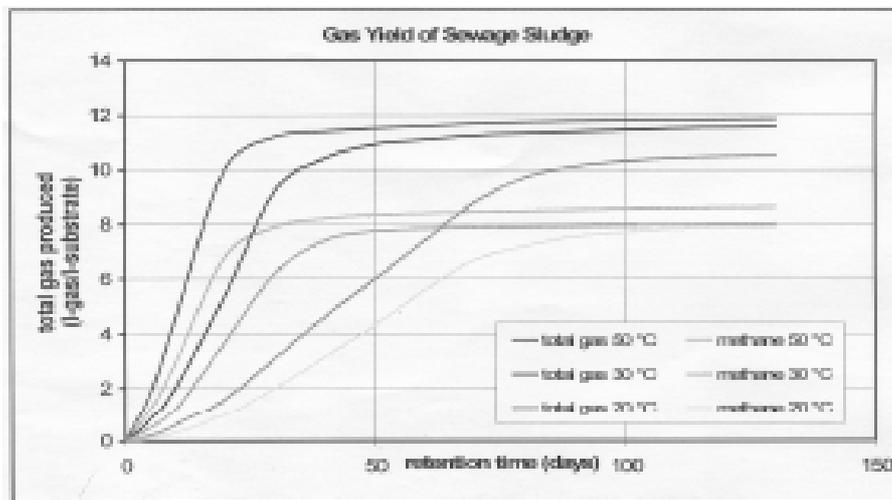
Siendo:

$V_{\text{gas}}$  = Volumen de gas generado.

$S_{\text{org.total}}$  = cantidad de materia orgánica total utilizada en el proceso.

La Figura 10 muestra los resultados obtenidos en este trabajo de la dinámica de generación de gas en un biodigestor a diferentes temperaturas para un mismo tipo de sustrato.

Figura 10. Producción de gas a diferentes temperaturas.



Fuente: SOGARI, Noemí. Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos. [23]

El modelo matemático de generación de gas en un biodigestor propuesto por Sogari es de característica exponencial, como se muestra en la Ecuación (3).

$$M_{\text{gen}} = M_{\text{max}} \cdot (1 - e^{-t/B}) \quad [\text{L/Kg}] \quad (3)$$

Donde:

$M_{\text{gen}}$  = Cantidad de metano generado durante el proceso de fermentación.

$M_{\text{max}}$  = Máxima cantidad de metano que puede producir un determinado elemento

$t$  = Tiempo considerado.

$B$  = Es una constante que depende de la temperatura de trabajo, el contenido de materia orgánica existente en el producto que se degrada, etc.

Este modelo establece el volumen de biogás generado por el biodigestor; sin embargo, como en la instrumentación del biodigestor desarrollada en este trabajo no hay medición de volumen de gas, se utilizó otro modelo matemático que permite evaluar el volumen de gas en función de la presión.

Este modelo fue propuesto en el trabajo de grado de la referencia [15], el cual establece una equivalencia entre las condiciones reales e ideales del gas, obteniendo la siguiente ecuación para relacionar el volumen del gas al interior del biodigestor:

$$V_n = V_{med} * \frac{P_a + P_L}{P_n} * \frac{T_n}{T_a} \quad [L] \quad (4)$$

Siendo:

$V_n$  = Volumen a condiciones normales [L]

$V_{med}$  = Volumen medido [L]

$P_a$  = Presión atmosférica real [Pa-absoluta]

$P_L$  = Presión de la columna de líquido [Pa]

$P_n$  = Presión a condiciones normales 101325 [Pa]

$T_n$  = Temperatura a condiciones normales 273,15 [K]

$T_a$  = Temperatura real del biogás [K]

**3.1.3 Modelo propuesto.** Tomando como referencia las ecuaciones (1), (3) y (4), se propone un modelo matemático, que permite obtener el volumen de gas generado en función de la presión de gas en el interior del biodigestor.

En la Ecuación (5) se presenta el modelo exponencial propuesto para caracterizar la presión al interior del biodigestor.

$$P_L = P_{max} * [1 - e^{-t*K}] \quad (5)$$

En esta ecuación  $K$  es el parámetro que establece la velocidad a la que se realiza la reacción química al interior del biodigestor y  $P_{max}$  es la máxima presión generada en él. La velocidad de crecimiento de la reacción química depende directamente del modelo de Arrhenius (ecuación (1)), ya que esta constante permite considerar el efecto de la temperatura en el proceso de fermentación; por lo tanto, reemplazando (1) en (5) se obtiene:

$$P_L = P_{max} * \left[ 1 - e^{-tAe^{-Ea/R*T}} \right] \quad (6)$$

La Ecuación (6) representa la presión en el interior del biodigestor para cualquier instante  $t$  a una temperatura determinada, por lo tanto al reemplazar (6) en (4), se obtiene una ecuación que representa el volumen de gas (en litros) generado por el biodigestor en cualquier instante de tiempo  $t$ :

$$V_n = \frac{V_{med}}{P_n} * \frac{T_n}{T_a} \left[ P_a + P_{max} \left[ 1 - e^{-tAe^{-Ea/R*T}} \right] \right] \quad (7)$$

Donde  $T_a = T$ , siendo  $T$  la temperatura del proceso.

Las constantes  $A$  y  $Ea$  son evaluadas considerando los resultados obtenidos experimentalmente. El tiempo  $t$  esta dado en segundos.

### 3.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para la parte experimental se realizaron tres procesos a diferentes temperaturas, cada uno de ellos con una duración promedio de un mes. Las temperaturas

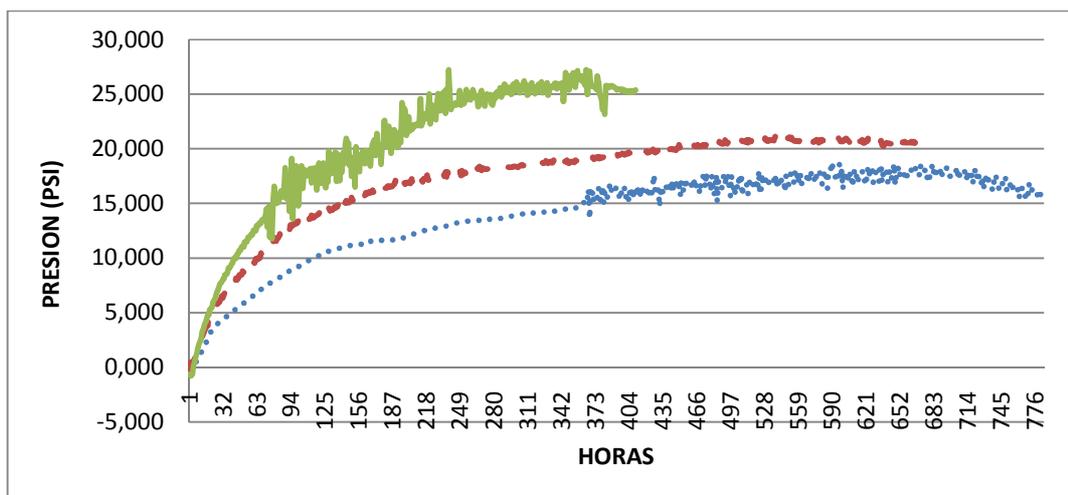
utilizadas fueron 307.15°K, 311.15°K y 313.15°K; esto con la finalidad de analizar el funcionamiento de la biodigestión en un ambiente de bacterias mesofílicas.

Como excreta se utilizó estiércol de cerdo, ya que por los antecedentes de otras investigaciones realizadas a nivel mundial el estiércol de cerdo es uno de los mayores productores de biogás por unidad de masa [11].

El sistema de adquisición de datos se configuró para que el *Data Logger* registrara información cada hora y de esa forma obtener una mayor cantidad de datos con respecto a investigaciones previas que registran análisis experimentales con un dato por día [23], [21], [14].

La Figura 11 presenta las tres curvas obtenidas de presión contra tiempo para las tres temperaturas seleccionadas, en ellas se comprueba el aumento en la velocidad de producción de biogás a medida que aumenta la temperatura del proceso.

Figura 11. Resultados experimentales de las curvas de presión a diferentes temperaturas



Fuente: Autores

Las curvas azul (puntos pequeños), roja (puntos grandes) y verde (línea continua) corresponden a la variación de la presión en el proceso a 307.15K, 311.15K y 313.15 K respectivamente. Comparando esta figura con la Figura 11, se puede apreciar un comportamiento similar.

A partir de los datos registrados en el *Data Logger*, se ajustaron las ecuaciones del modelo matemático que representan el comportamiento exponencial de las curvas de presión y volumen propuestos en las ecuaciones (5) y (7).

El primer parámetro evaluado fue la velocidad de reacción ( $K$ ) para cada proceso; a partir de este parámetro se obtienen los valores de la energía de activación ( $E_a$ ) y la constante  $A$  del modelo de Arrhenius, parámetros necesarios para obtener la Ecuación (7).

Los valores de la constante de velocidad  $K$ , para las diferentes temperaturas, se obtienen realizando iteraciones con el modelo para regresiones con funciones exponenciales de la forma:

$$x(t) = C1 * e^{-C2*t} + C3 \quad (8)$$

Donde  $C1 = - C3$  según el modelo planteado en la ecuación (5). El valor de la constante  $C2$ , que para este caso es la constante de velocidad de Arrhenius, se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$C3 = \bar{X} - \frac{C1}{n} * \sum_{i=1}^n e^{-t_i * C2} \quad (9)$$

Siendo:

$\bar{X}$  = valor promedio de los datos

$n$  = numero de datos tomados

$$C3 = - C1$$

Conocido el valor de C1 a partir del máximo valor de presión registrado para cada prueba, se realizan las iteraciones necesarias para encontrar el valor de C2 en cada uno de los tres escenarios realizados experimentalmente. Los resultados obtenidos son los siguientes:

$$P_1 = 125436,3521 * [1 - e^{-t*0.000001527}] \quad [\text{Pa}] \quad (10)$$

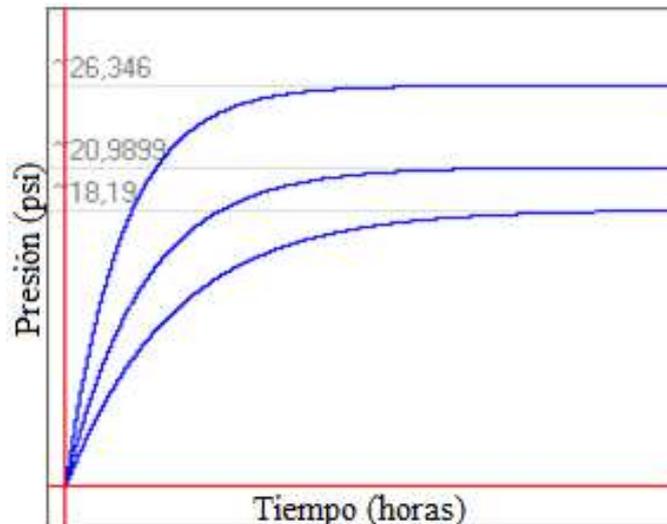
$$P_2 = 144720,9932 * [1 - e^{-t*0.0000023055}] \quad [\text{Pa}] \quad (11)$$

$$P_3 = 181649,3229 * [1 - e^{-t*0.00000275}] \quad [\text{Pa}] \quad (12)$$

Donde  $k_1 = 0,000001527 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ ,  $k_2 = 0,0000023055 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ ,  $k_3 = 0,00000275 \text{ [s}^{-1}\text{]}$

Las curvas correspondientes a las ecuaciones 10, 11 y 12 son las mostradas en la Figura 12

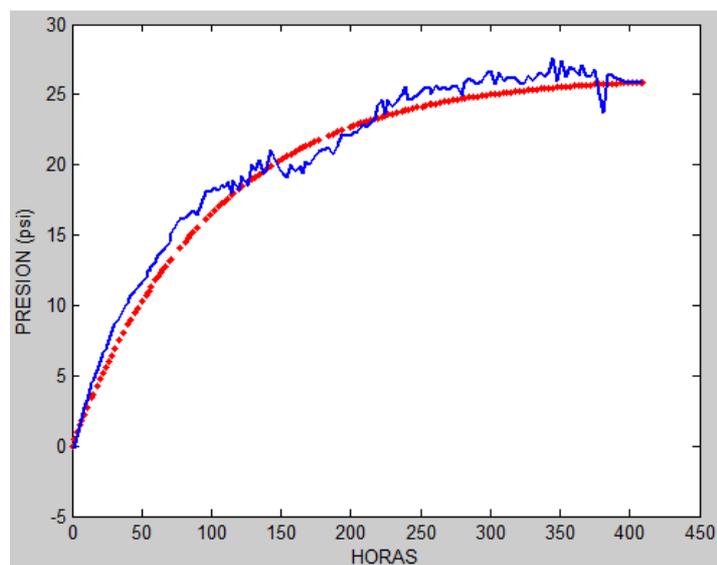
Figura 12. Modelos a partir de los datos experimentales



Fuente: Autores

Al comparar los datos de la curva experimental de presión a 313.15K (Figura 11) con la curva obtenida teóricamente para ese mismo valor de temperatura (Figura 12), se aprecia que los valores de presión son similares, como se detalla en la Figura 13. En esta figura, la curva azul (línea continua) representa los datos experimentales a 313.15K y la curva roja (punteada) representa el modelo teórico.

Figura 13. Comparación del modelo teórico con los datos experimentales.



Fuente: Autores

Una vez conocidos los valores de las constantes de velocidad de las reacciones químicas a cada una de las tres temperaturas, se obtiene la curva que mejor se ajusta al modelo de la Ecuación (1) (modelo de Arrhenius), lo cual permite establecer los valores de la energía de activación  $E_a$  y la constante  $A$

Utilizando la herramienta *cftool* de Matlab se realizó el ajuste de la curva con los valores de las constantes de velocidad para cada temperatura y el modelo encontrado fue:

$$K = 2,77638 * 10^7 e^{-9375,1/T} \quad (13)$$

Donde  $A = 2,77638 * 10^7 \text{ [s}^{-1}\text{]}$  y  $E_a/R = 9375,1 \text{ [K]}$

Despejando  $E_a$ , se obtiene que:

$$E_a = 77,9490064472 \text{ [KJ / mol]}.$$

Con la Ecuación (4) es estimado el volumen de biogás obtenido en cada caso, los valores son los siguientes:

$$V_1 = 11,07985 \text{ [L]} \quad \text{volumen a } 307,15 \text{ K}$$

$$V_2 = 11,99768 \text{ [L]} \quad \text{volumen a } 311,15 \text{ K}$$

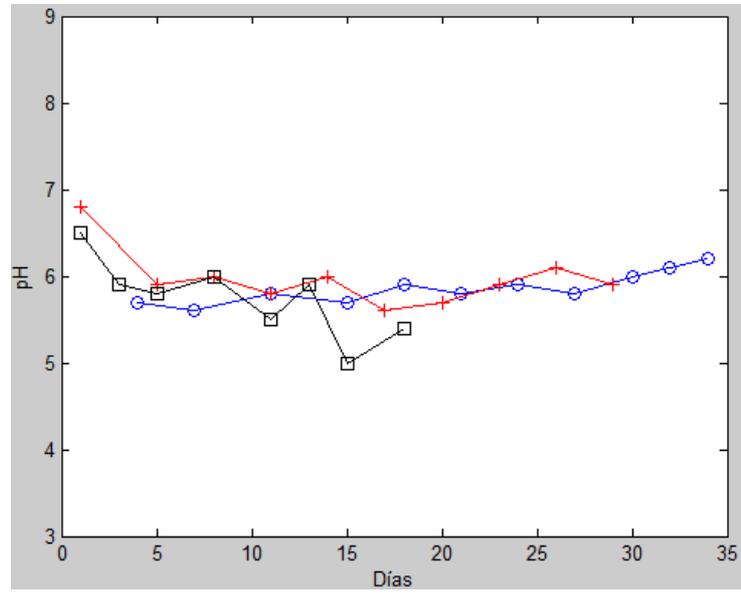
$$V_3 = 13,56127 \text{ [L]} \quad \text{volumen a } 313,15 \text{ K}$$

Con respecto a las mediciones de pH, estas fueron realizadas cada 2 o 3 días con el fin de garantizar que no se presentaran alteraciones en el proceso biológico.

A lo largo de los tres procesos realizados, se observó que el nivel pH no fue neutro como se esperaba según investigaciones previas [2][11], ya que el valor promedio medido fue de 5,8; como se puede observar en la Figura 14.

En esta figura, la curva azul (o) representa la variación del nivel pH para el proceso realizado a la temperatura de 307,15°K, mientras que la curva roja (+) representa la variación del nivel pH para el proceso realizado a la temperatura de 311,15°K y la curva negra representa la variación del nivel pH para el proceso realizado a la temperatura de 313,15°K.

Figura 14. Curvas de pH vs días transcurridos



Fuente: Autores

#### 4. CONCLUSIONES

Al aumentar la temperatura del proceso se logró llegar al valor máximo de presión en un menor tiempo, por lo tanto las pruebas realizadas corroboraron que la producción de biogás se acelera a medida que el proceso de biodigestión es efectuado a temperaturas más elevadas.

Utilizar un biodigestor de acero inoxidable y una manguera de cobre para la circulación del agua caliente, mejoró la transferencia de calor, lo cual permitió el aumento de la velocidad de calentamiento del sistema así como la conservación del calor dentro del biodigestor.

El efecto de la temperatura sobre el pH es mínimo cuando las bacterias utilizadas en el proceso son mesofílicas, ya que los valores registrados de esta variable para los tres escenarios planteados en este trabajo están en un rango promedio entre 5,5 y 6,0.

El programa utilizado para la adquisición de información es útil tanto para la realización de las gráficas de las variables con los datos registrados como para la detección de fallas en el proceso, lo cual permitió realizar las correcciones requeridas en el momento apropiado.

En esta investigación se trabajó dentro del rango mesofílico, por tal razón el sistema de control sólo requirió de la componente proporcional, ya que estas bacterias no se afectan por cambios de temperatura del orden de 0,5°K alrededor del *set point*. Sin embargo, en biodigestores con bacterias termofílicas, que requieren temperaturas más elevadas que las utilizadas en este trabajo, es necesario utilizar un controlador de mayor precisión (cambios de temperatura de

0,1°K) debido a que las bacterias termofílicas no soportan variaciones bruscas de temperatura.

Con respecto al sensor de temperatura, la mejor ubicación es en la mitad de los puntos donde la temperatura es mas alta y la temperatura es mas baja, esta es la forma mas fácil de identificar la temperatura promedio de la biomasa. Para mantener la temperatura homogénea se recomienda el uso de un agitador de biomasa.

El sensor de presión debe tener una salida eléctrica y analógica para poder almacenar datos en todo momento, ya que la curva de presión es necesaria para construir un modelo matemático.

La alternativa de utilizar el gas metano generado a base del estiércol animal tiene un bajo costo y además su producción puede ser constante, lo cual la convierte en una solución viable para comunidades tanto rurales como urbanas y a la vez es una alternativa para mejorar los problemas ambientales que se tienen actualmente por la utilización de recursos no renovables.

La instrumentación utilizada en este proyecto se puede adaptar a cualquier tipo de biodigestor ya sea de flujo discontinuo o continuo, debido a que los acoples mecánicos son fáciles de ajustar y el tipo de variables sensadas son necesarias para cualquier tipo de biodigestor ya sea para la lectura de datos o simplemente para accionar una alarma.

El modelo matemático propuesto es útil para realizar estimaciones de volumen de biogás en cualquier tipo de biomasa, siempre y cuando se determine su energía de activación  $E_a$  y la constante de velocidad  $A$ .

## **5. RECOMENDACIONES**

Las condiciones climáticas exteriores al biodigestor afectan el consumo de energía necesario para mantener las bacterias mesófilas a su temperatura de trabajo; por tanto en el caso de una aplicación industrial es recomendable instalar sistemas de control de temperatura cuando los biodigestores se encuentran ubicados en zonas con condiciones climáticas frías.

Para futuros trabajos, es recomendable utilizar un sensor de temperatura en el tanque de almacenamiento de agua que permita controlar la temperatura de este líquido, para disminuir las pérdidas de energía al reducir el tiempo de trabajo del sistema de calefacción. Adicionalmente se recomienda utilizar un tanque cerrado para evitar la pérdida de agua por evaporación.

## BIBLIOGRAFIA

1. Bacteria metanogénica [online][citado en 31/08/09]. Disponible en: [http://mx.encarta.msn.com/encyclopedia\\_761572746/Bacteria\\_metanog%C3%A9nica.html](http://mx.encarta.msn.com/encyclopedia_761572746/Bacteria_metanog%C3%A9nica.html)
2. BOTERO BOTERO, Raúl y PRESTON, Thomas. Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización. Edición 1987, pg 12
3. CHAÚR BERNAL, Jairo. El biogás. Boletín didáctico No 32, Bogotá, Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), abril de 2001, pg. 13,16 y 17.
4. Diagramas de Proceso e Instrumentación (P&ID) [online]. Normas ISA S5.1 - S5.3. [citado en 25/11/2009] Disponible en: <http://bc.inter.edu/facultad/arincon/Diagramas%20de%20Proceso%20e%20Instrumentacion.doc>
5. Diagramas P&I. Normas de representación [online]. [citado en 26/11/2009] Disponible: [http://www.herrera.unt.edu.ar/controldeprocesos/Tema\\_1/tp1c.pdf](http://www.herrera.unt.edu.ar/controldeprocesos/Tema_1/tp1c.pdf).
6. Energía de activación. Ecuación de Arrhenius. Catálisis [online]. [citado en 20/11/2009] Disponible en: [http://www.hiru.com/es/kimika/kimika\\_01600.html](http://www.hiru.com/es/kimika/kimika_01600.html)
7. Factores que afectan la producción de biogás [online] 02/12/2005 [citado en 12/06/2009]. Disponible en <http://www.textoscientificos.com/energia/biogas/factores>.

8. FUNDACIÓN HÁBITAT, Biodigestores Una alternativa a la autosuficiencia energética y de biofertilizantes [Documento online]. [Quimbaya, Quindío-Colombia], 2 de Abril de 2005, [citado en 12/06/2009]. Disponible en: < <http://imagenes.tupatrocinio.com/img-bbdd/documentos/biodigestores.doc>> .
9. Guía práctica, presión, temperatura y humedad relativa [online]. Gava, España. Parker, Legris Cenrasa SA. [citado en 30/08/2009] Disponible en internet: <<http://www.parkertransair.com/jahia/Jahia/filiale/spain/lang/es/home/TechnicalCenter/PracticalAirGuide>>.
10. HERNÁNDEZ, Jessica y SIERRA, Javier Optimizadores para un modelo de regresión exponencial [online]. Bayamón, Puerto Rico. [citado en 09/04/2010]. Disponible en: <<http://bc.inter.edu/facultad/jsierra/optimizadores%20modelo%20exponencial.htm>>
11. INFANTES CHÁVEZ, Pablo. Diseño de biodigestores [online]. 29/09/2006 [citado en 12/06/2009]. Disponible en: <[http://www.engormix.com/disenio\\_biodigestores\\_s\\_articulos\\_976\\_POR.htm](http://www.engormix.com/disenio_biodigestores_s_articulos_976_POR.htm)>.
12. Instituto de Ingeniería Mecánica y producción industrial IIMPI. Sensores de temperatura [online]. [Uruguay] [citado en 09/08/2009] Disponible en: <[http://www.fing.edu.uy/iimpi/academica/grado/instindustrial/teorico/080306-Sensores-parte\\_II.temperatura.pdf](http://www.fing.edu.uy/iimpi/academica/grado/instindustrial/teorico/080306-Sensores-parte_II.temperatura.pdf)>.
13. Introducción a la instrumentación [online]. CIPQ, Marga Marcos, ESI de Bilbao, 2003. [citado 01/08/2009]. Disponible en: <[http://www.disa.bi.ehu.es/spanish/asignaturas/15212/TEMA\\_2\\_IntroduccionInstrumentacion.pdf](http://www.disa.bi.ehu.es/spanish/asignaturas/15212/TEMA_2_IntroduccionInstrumentacion.pdf)>.

14. MAGAÑA, Luis, *et al.* Producción de biogás a nivel laboratorio utilizando estiércol de cabra. Guanajuato, México. Acta universitaria, año/vol. 16, número 002, mayo-agosto 2006, pg. 27-37.
15. MARTINEZ RAMIREZ, Guillermo Andrés y RODRIGUEZ WALTEROS, Carolina. Diseño y construcción de un biodigestor anaerobio de lecho fijo para operación en continuo a escala piloto con control de temperatura y pH. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander. 2007. p 56.
16. MONCAYO ROMERO, Gabriel y ARRUE, Ramón. Construcción de biodigestores para el aprovechamiento del estiércol de animales para producción de biogás y energía eléctrica [online]. Chile. Colegio de ingenieros agrónomos de Chile. [Citado en 13/06/2009]. Disponible en: <<http://www.agronomos.cl/2007/feb/htm/construccion.htm>>
17. PIP PIC001 Piping and Instrumentation Diagram Documentation Criteria [online]. Process Industry Practices P&ID. Abril 2008 [citado en 25/11/2009] pg 25-32. Disponible en:< <http://www.pip.org/downloads/Sample-PID.pdf>>.
18. Presión [online] NUÑEZ, Marco. [citado en 15/10/2009] Disponible en: <<http://www.monografias.com/trabajos11/presi/presi.shtml>>.
19. ¿Qué es el biogás?, Digestión anaerobia, características y usos del biogás [online]. Biodisol [citado en 11/06/09] Disponible en: <<http://www.biodisol.com/biocombustibles/biogas-que-es-el-biogas-digestion-anaerobia-caracteristicas-y-usos-del-biogas-energias-renovables-biocombustibles/>>.

20. RAMÓN, Jacipt; GASTELBONDO BARRAGAN, Walter y ROMERO CASTELLANOS, Luis Fernando. Desarrollo de la ingeniería básica y de detalle para la automatización de una planta piloto generadora de biogás EN: Revista colombiana de tecnologías de avanzada [online]. Universidad de Pamplona, Colombia, Año 2007, [citado en 17/10/2009] volumen 2 - Número 10. Pg 108-113. ISSN: 1692-7257. Disponible en: <[http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/hermesoft/portallG/home\\_18/recursos/01\\_general/documentos/16052008/rev\\_tec\\_avan\\_art18\\_vol2\\_num10.pdf](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/hermesoft/portallG/home_18/recursos/01_general/documentos/16052008/rev_tec_avan_art18_vol2_num10.pdf)>.
21. RAMOS, José Alfredo y HERNANDEZ, Jorge Isaac. Implementación de un Biodigestor Anaerobio para la Generación de Energía Eléctrica a partir de Lodos Activados, Producto del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de la Ciudad de Abasolo. Ciudad de Abasolo, México. Aquaforum, año 11 N° 46, 2007, pg. 25-31.
22. SMITH, Carl; CORRIPIO, Armando. Control automático de procesos. Teoría y práctica. Segunda edición. Editorial Limusa. Versión autorizada en español de la obra publicada en inglés por John Wiley & Sons, Inc. con el título: *Principles and practice of automatic process control*. México D.F 1991. Pg. 152-160. ISBN 968-18-3791-6.
23. SOGARI, Noemí. Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos. Branschweig –Germany. Universidad Nacional del Nordeste, Argentina. Comunicaciones científicas y Tecnológicas. Resumen: T-027. 2003.
24. Termometría–sensores de temperatura [online]. Física re-Creativa, S. Gil y E. Rodríguez. [citado en 09/08/2009] Disponible en: <<http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/temperatura/temp.pdf>>

