



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO.

AUTORES:

CHAVEZ JACOME JOSE FELIX
VELASCO OLAVE JESSICA ELIZABETH

**TEMA: MODELACIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE
UNA MICROPLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE
BIOMASA RESIDUAL PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS
RENOVABLES DEL DECEM DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS
ARMADAS - ESPE**

**DIRECTOR: REINALDO DELGADO, PhD
CODIRECTOR: MSc. JOSE GUASUMBA C**

SANGOLQUÍ, MAYO 2015

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZA ARMADAS
INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICADO DE ELABORACIÓN DEL PROYECTO

Reinaldo Delgado García y José Guasumba Codena

CERTIFICAN

Que el trabajo titulado **“MODELACIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA MICROPLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE BIOMASA RESIDUAL PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES DEL DECEM DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE”**, ha sido realizado en su totalidad por José Félix Chávez Jácome y Jessica Elizabeth Velasco Olave como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica.

Sangolquí, 11 de Mayo de 2015.

Reinaldo Delgado García
DIRECTOR

José Guasumba Codena
CODIRECTOR

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

José Félix Chávez Jácome y Jessica Elizabeth Velasco Olave

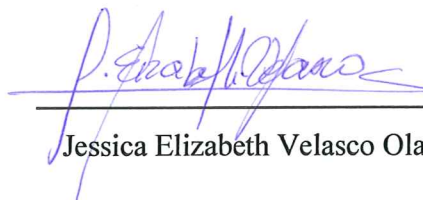
DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado “**MODELACIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA MICROPLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE BIOMASA RESIDUAL PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES DEL DECEM DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan el pie de las páginas correspondiente, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.



José Félix Chávez Jácome

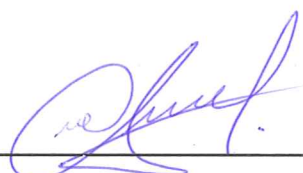


Jessica Elizabeth Velasco Olave

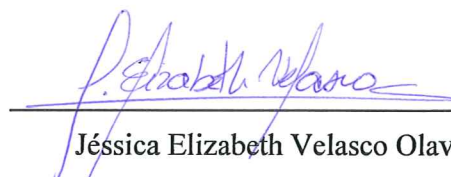
AUTORIZACIÓN

Nosotros, José Félix Chávez Jácome y Jessica Elizabeth Velasco Olave

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE la publicación en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado **“MODELACIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA MICROPLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE BIOMASA RESIDUAL PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES DEL DECEM DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad.



José Félix Chávez Jácome



Jéssica Elizabeth Velasco Olave

Sangolquí, 11 de Mayo de 2015

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO DE ELABORACIÓN DEL PROYECTO.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	viii
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE CUADROS	xvi
LISTA DE TABLAS.....	xvi
RESUMEN.....	xviii
SUMMARY	xix
CAPITULO 1: GENERALIDADES	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Definición del Problema	5
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo General.....	6
1.3.2 Objetivos Específicos	7
1.3.3 Alcance	7

1.4	Justificación e Importancia	8
CAPITULO 2: BIODIGESTORES		10
2.1	Tipos de Digestores según su alimentación o carga	11
2.2	Digestores Tradicionales.....	12
2.3	Digestor Hindú o de campana flotante.....	12
2.3.1	Digestor Chino o de campana fija	12
2.4	Digestores para procesos industriales	13
2.5	Materias Primas para producción de Biogás.....	15
2.5.1	Tipos de sustratos	16
2.6	Acumuladores de Biogás	17
2.6.1	Acumuladores de baja presión.....	17
2.6.2	Acumuladores de alta presión.....	18
2.7	Selección de Alternativas.....	19
CAPITULO 3: BIODIGESTION ANAEROBICA.....		20
3.1	Etapas del Proceso de Fermentación Anaeróbica	20
3.1.1	Periodo de producción de ácidos (I)	20
3.1.2	Período de digestión de ácidos (II)	21
3.1.3	Período de digestión intensiva o fermentación alcalina (III).....	21
3.2	Estequiometria del Proceso.....	22
3.3	Condiciones del Proceso	24
3.3.1	Material de carga para la fermentación	24

3.3.2	Concentración de la carga.....	26
3.3.3	Temperatura.....	28
3.3.4	Valor del PH.....	30
3.3.5	Promotores o inhibidores de la fermentación.....	30
3.4	Características del Biogás.....	31
3.5	Tipos de Mezclas.....	33
CAPITULO 4: DISEÑO MECATRÓNICO.....		35
4.1	Diseño Mecánico.....	35
4.1.1	Sistema de Digestión.....	36
4.1.2	Sistema de almacenamiento del biogás.....	47
4.1.3	Sistema de accesorios.....	50
4.2	Diseño electrónico.....	53
4.2.1	Sistema de Sensores:.....	53
4.2.2	Sistema de control.....	58
4.2.3	Sistema de Actuadores:.....	63
4.2.4	Placa de Control.....	66
4.3	Diseño de Software.....	68
4.3.1	Software Datalogger.....	68
4.3.2	Procesamiento de datos.....	77
CAPITULO 5: CONSTRUCCION Y MONTAJE.....		79
5.1	Construcción del Sistema Mecánico.....	79

5.1.1	Construcción de los Digestores	80
5.1.2	Agitador Mecánico	81
5.1.3	Acoples mecánicos	82
5.2	Construcción del Sistema Electrónico	85
5.2.1	Circuito de Potencia.....	85
5.2.2	Circuito de Control	89
5.3	Montaje del Equipo.....	90
CAPITULO 6: PRUEBAS		96
6.1	Parámetros del ensayo.....	96
6.2	Procedimiento para el ensayo	100
6.3	Toma de Datos.	105
6.4	ANALISIS DE RESULTADOS	106
6.4.1	Comportamiento de la temperatura en la cámara de agua	108
6.4.2	Comportamiento de la temperatura dentro del Sustrato	110
6.4.3	Comportamiento del pH en el Sustrato.....	112
6.4.4	Comportamiento de la Presión en la cámara de fermentación ...	114
6.4.5	Comportamiento de las gráficas de pH y Presión Interna.	116
6.4.6	Sustrato en los tanques después de finalizar el ensayo.....	120
CAPITULO 7: ANALISIS FINANCIERO.....		123
7.1	Detalle de gastos	123
7.2	Análisis de la instrumentación utilizada.	125

7.3 Costo de energía consumida por el equipo	126
CAPITULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	128
CONCLUSIONES	128
RECOMENDACIONES	131
BIBLIOGRAFÍA.....	132
ANEXOS	137
ANEXO A: PLANOS DE CONSTRUCCIÓN.....	138
ANEXO B: ESQUEMAS DE LA PLACA DE CONTROL.....	148
ANEXO C: CODIGO FUENTE DEL HMI.....	150
ANEXO D: DATOS DEL ENSAYO.....	159

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Consumo mundial de energía primaria.....	2
Figura 2.1 Digestor de tipo Hindú o de campana flotante	12
Figura 2.2 Digestor de tipo Chino o de campana fija	13
Figura 2.3 Digestor de Tipo Bolsa	14
Figura 2.4 Tipos de Gasómetros.	18
Figura 3.1 Etapas de la Fermentación Anaerobica.....	21
Figura 4.1 Relación del área en función del radio	39
Figura 4.2 Cámara de Fermentación (CF).....	40
Figura 4.3 Tapa de la cámara de fermentación	41
Figura 4.4 Cámara de Agua o Sistema de Calentamiento.....	41
Figura 4.5 Agitadores tipo turbina	44

Figura 4.6	Agitador tipo disco con turbina	46
Figura 4.7	Agitador tipo turbina con 2 juegos de aspas.....	47
Figura 4.8	Bocín base para el agitador.....	47
Figura 4.9	Gasómetro de polietileno.....	48
Figura 4.10	Tapón fusible marca UMCO.....	51
Figura 4.11	Racor metálico con rosca de 1/2".....	51
Figura 4.12	Conectores herméticos para cables eléctricos.....	52
Figura 4.13	Válvula tipo presta	52
Figura 4.14	Sensor de temperatura DS18B20	54
Figura 4.15	Electrodo EXTECH	55
Figura 4.16	Circuito de PH Atlas Scientific.....	56
Figura 4.17	Sensor MPX5700	57
Figura 4.18	Capacitores de acondicionamiento para el sensor de presión	58
Figura 4.19	Función de transferencia Voltaje Vs Presión diferencial.....	58
Figura 4.20	Arduino Mega 2560	59
Figura 4.21	Esquemático módulo RTC DS1307.....	60
Figura 4.22	Módulo RTC DS1307	60
Figura 4.23	Pantalla TFT de 3.2 pulgadas.....	60
Figura 4.24	Módulo reductor de voltaje para la pantalla.....	61
Figura 4.25	Módulo SD.....	62
Figura 4.26	Esquemático módulo SD.....	62
Figura 4.27	Tarjeta SD	62
Figura 4.28	Resistencia eléctrica de inmersión	63
Figura 4.29	Relé de estado sólido.....	65

Figura 4.30	Diagrama de conexión	65
Figura 4.31	Placa de Control	66
Figura 4.32	Modelo de la caja de control con sus elementos	67
Figura 4.33	Algoritmo de la pantalla inicial.....	69
Figura 4.34	Pantalla inicial.....	70
Figura 4.35	Pantalla de selección de parámetros.....	70
Figura 4.36	Pantalla de confirmación.....	70
Figura 4.37	Algoritmo de la pantalla de ingreso de parámetros.....	71
Figura 4.38	Algoritmo de la pantalla de confirmación.....	72
Figura 4.39	Ubicación de los sensores respecto de las resistencias	73
Figura 4.40	Algoritmo del controlador.....	73
Figura 4.41	Muestreo de datos del controlador	74
Figura 4.42	Pantalla de registro de datos.....	76
Figura 4.43	Algoritmo del registro de datos.....	76
Figura 4.44	Cuadro de diálogo para abrir el archivo de datos.....	77
Figura 4.45	Ventana de error	77
Figura 4.46	Ejemplo de gráfica de PH en ambos tanques	78
Figura 5.1	Localización de la empresa.....	79
Figura 5.2	Agitador mecánico.....	82
Figura 5.3	Acoples roscados	83
Figura 5.4	Bocín para el agitador	84
Figura 5.5	Tapa con sus accesorios.....	84
Figura 5.6	Circuito de conexión Etapa de Potencia.	87
Figura 5.14	Caja de protección eléctrica	94

Figura 5.15	Placa de Control	94
Figura 5.16	Caja PLA de la placa de control.....	95
Figura 5.17	Digestores de Microplanta generadora de Biogás.....	95
Figura 6.1	Muestra inicial antes del proceso de secado.	100
Figura 6.2	Calefactor 110 V AC	101
Figura 6.3	Muestra después del proceso de secado.....	101
Figura 6.4	Carga de estiércol en los digestores.....	103
Figura 6.5	Carga de agua de lluvia en los digestores.....	104
Figura 6.6	Carga de sangre en los digestores.....	104
Figura 6.7	Montaje final de la tapa, empaque, en el digestor cargado.....	105
Figura 6.8	Archivos .txt generados en la SD	106
Figura 6.9	Comportamiento de controlador en el Tanque T0.....	109
Figura 6.10	Comportamiento del controlador del Tanque T1	109
Figura 6.11	Comportamiento de las temperaturas dentro del Sustrato	111
Figura 6.12	Temperaturas de biogás en ambos tanques	112
Figura 6.13	Grafica de comportamiento del pH durante el proceso del T0 ..	113
Figura 6.14	Grafica de comportamiento del pH durante el proceso del T1 ..	114
Figura 6.15	Variación de la presión manométrica en los tanques T0 y T1 ..	115
Figura 6.16	Variación de la presión manométrica tanque T0	115
Figura 6.17	Variación de la presión manométrica tanque T1	116
Figura 6.18	Graficas de Presión y pH del tanque T0	117
Figura 6.19	Graficas de Presión y pH del tanque T1	119
Figura 6.20	Sustrato del tanque T0 al finalizar el ensayo	120
Figura 7.1	Detalle de la inversión	125

Figura 7.1	Detalle de la inversión	125
Figura 7.2	Controlador del tanque 0 activado a 20 grados	126
Figura 7.3	Controlador del tanque 1 activado a 35 grados.	127

LISTA DE CUADROS

Cuadro 4.1	Elementos del Sistema Mecánico	35
Cuadro 4.2	Esquema del sistema electrónico	53
Cuadro 4.3	Estructura del Software	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica	4
Tabla 2.1	Residuos orgánicos de diversos orígenes	15
Tabla 2.2	Clasificación de sustratos para la Digestión Anaeróbica	16
Tabla 2.3	Selección de alternativas para el biodigestor	19
Tabla 3.1	Porcentajes de C y N en la fermentación anaeróbica	26
Tabla 3.2	Porcentaje de humedad y sólidos totales	27
Tabla 3.3	Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica	28
Tabla 3.4	Concentración de inhibidores comunes	30
Tabla 3.5	Componentes típicos del biogás y sus efectos	32
Tabla 3.6	Energía equivalente Biogás Vs. otras fuentes	32
Tabla 3.7	Formulaciones para preparación del sustrato	34
Tabla 4.1	Peso específico de las fracciones de RSU	36
Tabla 4.2	Calculo de alturas, h/d, y áreas en función de nuevos radios	39
Tabla 4.3	Detalle de agujeros en la tapa de la CF	40

Tabla 4.4	Proporciones básicas para diseño de agitador tipo turbina.....	45
Tabla 4.5	Cálculos de las proporciones del agitador	46
Tabla 4.6	Especificaciones técnicas del sensor DS18B20.....	54
Tabla 4.7	Especificaciones técnicas del electrodo EXTECH.....	56
Tabla 4.8	Especificaciones técnicas del sensor MPX5700.....	57
Tabla 4.9	Especificaciones técnicas de la pantalla	61
Tabla 4.10	Especificaciones técnicas del relé.....	65
Tabla 4.11	Estructura del archivo de datos.....	75
Tabla 5.1	Accesorios de la tapa con las medidas de sus roscas externas. ...	83
Tabla 5.2	Tipos de Conductores Eléctricos	85
Tabla 6.1:	Composición de los sustratos empleados en los tanques	106
Tabla 6.2	Descripción de los sustratos en los tanques T0 y T1	107
Tabla 7.1	Detalle de gastos	124
Tabla 7.2	Ejemplo de costos para sensores industriales	126

SUMMARY

Throughout history, mankind has centered its efforts in obtaining energy from burning fossil sources, creating a strong need to research renewable energies such as biomass, since fossil sources will eventually come to an end. Biodigester research throughout the years has usually been done empirically, thus, there are few papers where the process variables are directly measured in order to determine the effect of them in biogas production. Therefore, this project poses a small scale biodigester, bound to measure and record process variables such as temperature and PH. This micro plant consists of two independent tanks capable of harboring 27 liters of substrate, and an HMI, which allows the user to set the desired parameters and monitor process variables in real time throughout the assay. In addition, the micro plant stores data every minute onto a simple text file which can be opened with a computer. This equipment has been subjected to several tests to ensure performance. Also a financial analysis has been made. And an assay of PH and temperature behavior for a 50:50 blood and excrement mix is presented.

Key words

BIOGAS

BIODIGESTOR

SUBSTRATE

ANAEROBIC PROCESS

METHANOGEN BACTERIA

RESUMEN

En la historia, la humanidad se ha centrado en el uso de energía en base de combustibles fósiles, causando un fuerte impacto ambiental, sin embargo en la última década surge la necesidad de desarrollar el uso de energías renovables ya que los combustibles fósiles se acabaran eventualmente. El estudio de los biodigestores a lo largo de los años se lo ha realizado siempre de manera empírica, habiendo muy pocos ensayos que monitoreen directamente las variables del proceso para determinar la influencia de las mismas en la producción de biogás. Por ello, en el presente proyecto, se plantea un equipo de producción de biogás a pequeña escala, capaz de monitorear directamente las variables más importantes del proceso: temperatura y PH. La microplanta se conforma de dos tanques independientes, y una interfaz HMI, que permite al usuario seleccionar la temperatura deseada y visualizar las principales variables en tiempo real durante todo el proceso. Adicionalmente la microplanta recopila los datos cada minuto, y los organiza en un archivo de texto que puede abrirse en un computador. El equipo instalado se ha sometido a pruebas de funcionamiento, donde se ha comprobado su desempeño. Posterior a ello se presenta un análisis económico del mismo, y un análisis del comportamiento del PH para una mezcla 50:50 de sangre y estiércol de chanco.

Palabras claves

BIOGÁS

DIGESTOR

SUSTRATO

PROCESO ANAERÓBICO

BACTERIAS METANOGÉNICAS

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

A lo largo de la historia el desarrollo de la humanidad se ha basado en el consumo de grandes cantidades de energía, como bien es sabido la mayor parte de los recursos naturales de la tierra proviene de la irradiación solar, la cual la podemos encontrar de forma directa o indirecta como por ejemplo energía eólica, hidráulica etc., sin embargo pese a los grandes avances tecnológicos aún no hemos sido capaces de aprovechar eficazmente esta fuente inagotable de energía y nos hemos centrado más en el uso de recursos fósiles como son el carbón, gas natural y el petróleo:

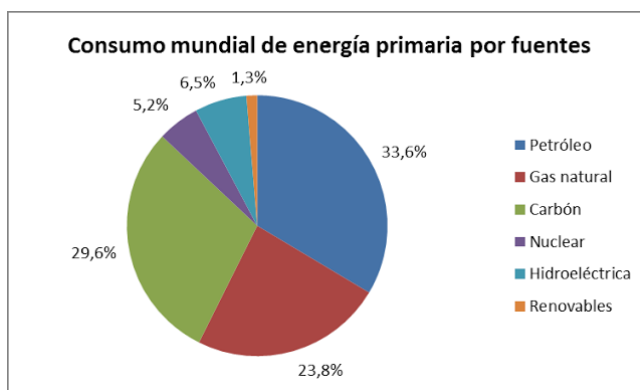


Figura 1.1 Consumo mundial de energía primaria

Fuente: Paladini, 2012

En base a la Figura 1 se observa que el consumo mundial energético para el año 2012 fue:

- Fuentes de Energía Renovable: 13%
- Fuentes de Energía no Renovable: 87%

Los recursos renovables son aquellos que, tras ser utilizados, pueden regenerarse natural o artificialmente, como el agua o los alimentos. Son recursos que, al estar sometidos a ciclos, se mantienen de forma más o menos constante en la naturaleza.

Los recursos no renovables son aquellos cuya velocidad de consumo es mayor que la de su regeneración, lo que consecuentemente puede provocar su agotamiento como es el caso de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) y de los minerales.

Debido a este porcentaje alto de consumo de recursos no renovables, se ha generado un interés creciente sobre el desarrollo de tecnologías que hagan uso de energías renovables, teniendo un alto grado de rentabilidad y un bajo impacto ambiental siendo una de estas la energía de biomasa.

La biomasa, es una de las energías renovables que cuentan hoy en día con una muy buena proyección ya que puede considerarse prácticamente inagotable; ésta,

engloba la materia vegetal generada a través de la fotosíntesis, y sus derivados, tales como los residuos forestales y agrícolas, además de los animales y la materia orgánica contenida en los residuos industriales, domésticos y urbanos. Estos materiales contienen la energía química proveniente de la transformación energética de la radiación solar, la cual puede ser liberada por medio de una combustión directa, o puede ser convertida, a través de algún proceso (López M., 2011)

De esta energía de biomasa podemos obtener a diferentes tipos de biocombustibles como por ejemplo: Biocombustibles sólidos, Biocombustibles líquidos o biocarburantes, Biocombustibles gaseosos (Biogás), Biomasa natural y Biomasa residual, los cuales son empleados para distintos fines energéticos.

A comienzos de 1866, Antoine Béchamp, biólogo francés, fue uno de los primeros en demostrar, concluyentemente, que la formación de metano era un proceso biológico. Aunque otros autores, atribuyen este hecho a un compañero suyo llamado Tappeiner.

Posteriormente en 1868, Béchamp fue quién identificó que una población mixta de microorganismos convertía el etanol en metano, y que algunos de los productos finales formados durante el proceso de fermentación dependían del sustrato. (Lobera Lössel, 2011)

En el siglo XIX en Francia Louis Mouras describe el tratamiento anaeróbico de aguas residuales domesticas el cual se llevó a cabo en una cámara cerrada herméticamente, en el cual los sólidos sedimentados se degradaron anaeróbicamente. Estas investigaciones establecieron que la metanogénesis además de ser un proceso derivado del rompimiento de materiales poliméricos es un proceso dependiente de la temperatura. (López M., 2011)

El efecto de la temperatura en el proceso de metanogénesis es considerado uno de los parámetros más importantes en el diseño de biodigestores. Las variaciones bruscas de temperatura pueden generar una desestabilización en el proceso.

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos: psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 25 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C), siendo la velocidad máxima específica de crecimiento (μ_{max}) mayor, conforme aumenta el rango de temperatura.

Tabla 1.1

Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica.

<i>Fermentación</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Óptimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Tiempo de fermentación</i>
<i>Psychophilica</i>	4-10 °C	15-18°C	20-25°C	<i>Sobre 100 días</i>
<i>Mesophilica</i>	15-20 °C	25-35°C	35-45°C	<i>30-60 días</i>
<i>Thermophilica</i>	25-45°C	50-60°C	75-80°C	<i>10-15 días</i>

Fuente: Varnero, 2011

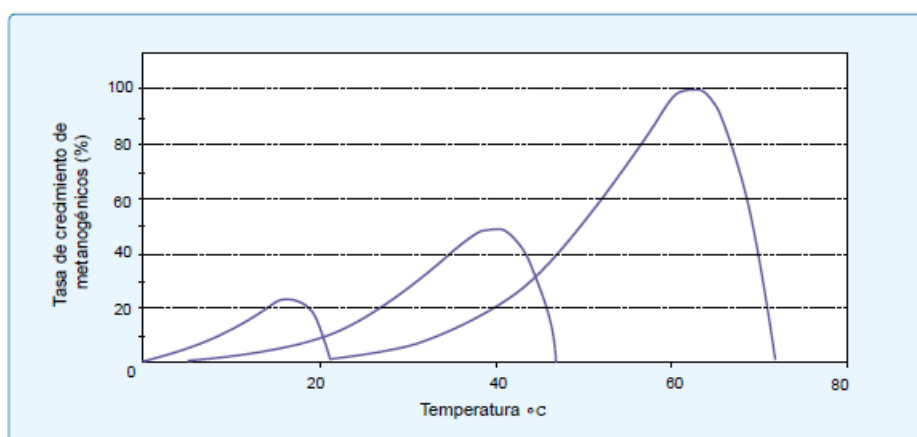


Figura 1.1 Tasa de crecimiento relativo de microorganismos

Fuente: Varnero, 2011

En general la mayoría de digestores se diseñan para que trabajen en rango mesofílico, ya que la temperatura se puede estabilizar sin requerir grandes transferencias de energía para el biodigestor. Para un óptimo funcionamiento del

digestor, se recomienda que el tratamiento anaeróbico se diseñe para que opere con variaciones de temperatura que no excedan los 0.6 – 1.2 °C /día. (Varnero, 2011)

En la mayoría de casos, los biodigestores se diseñan con materiales aislantes para retener las condiciones de temperatura internas sin requerir de transferencia de energía para mantener la temperatura.

En la Universidad Distrital Francisco de Caldas se ha realizado un estudio para 7 biodigestores tipo Batch, donde se ha realizado distintas pruebas enfocadas a varios factores clave del proceso de biodigestión, como son los tipos de mezclas, las temperaturas, el tiempo de retención, etc. Una de las pruebas realizadas incluye el control de temperatura colocando los biodigestores en una piscina térmica donde el control se lo realiza general con una resistencia eléctrica. Este estudio permite observar directamente las variaciones de temperatura y como afectan al tiempo de retención, sin embargo el control de temperatura es general, y no está individualizado para cada biodigestor. (López M., 2011)

Adicionalmente una tesis de maestría en mecatrónica, plantea el control térmico de un biodigestor de tipo continuo, con distintas temperaturas para las fases de hidrólisis, acetogénesis y metanogénesis. En este biodigestor se utiliza control difuso, y se comprueban las condiciones térmicas teóricas para la metanogénesis realizada por microorganismos mesófilos. Este caso particular permite el estudio de las distintas fases del proceso, sin embargo no permite el estudio de muestras independientes por ser un modelo continuo y de varias fases. (Aguilar, 2013)

1.2 Definición del Problema

Actualmente en los laboratorios del DECEM se han realizado un sin número de pruebas con el fin de conocer la caracterización de diferentes mezclas de sustrato

para la producción de biogás a través de un proceso de digestión anaerobia, sin embargo estos datos no son constantes ya que varían debido a los diferentes factores ambientales que se presentan a la hora del proceso de digestión, uno de ellos, la temperatura ambiente a la cual se realiza el proceso.

Los laboratorios no cuentan con un equipo capaz de poder controlar y registrar estas variables del proceso de digestión, con el fin de realizar la caracterización de las mezclas de sustrato así como generar biogás de una forma controlada y eficiente.

Debido a este problema que se ha presentado, se hace necesario crear una microplanta generadora de biogás capaz de controlar y registrar las variables implícitas en el proceso de biodigestión, la misma que estará orientada a la utilización de desechos orgánicos, esta microplanta constará de dos tanques independientes de tipo batch o estacionario, con sus respectivos sensores.

Se determinará la tecnología necesaria para realizar un control óptimo de la temperatura de los tanques, así como el monitoreo, almacenamiento y gestión de los datos obtenidos por los sensores con los que contará la planta.

Este proyecto está orientado a la automatización de la microplanta con el fin de que se mantengan las condiciones óptimas de temperatura para que se permita el proceso de metanogénesis, y de este modo poder estudiar los demás factores que intervienen en el proceso de biodigestión.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Modelar, implementar y automatizar una microplanta de producción de biogás a partir de biomasa residual destinada para el departamento de Energías Renovables del DECEM.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un sistema de control de temperatura que permita mantener la temperatura ideal para mantener la reproducción bacteriana durante la biodigestión anaerobia.
- Verificar el funcionamiento de los digestores, en cuanto a la cantidad de biogás producido en base a la biomasa empleada (rendimiento).
- Determinar la diferencia de biogás producido por la planta con el control de temperatura, respecto de la planta sin controlar.
- Analizar el comportamiento de las variables de temperatura y pH en los diferentes controladores en los digestores
- Establecer si existe rentabilidad al utilizar un control en base a energía eléctrica en el biodigestor

1.3.3 Alcance

Para el desarrollo del presente proyecto se establecen 3 Etapas fundamentales:

- Estudio teórico
- Diseño y Construcción
- Entrega del Equipo

La primera fase involucra el estudio y recopilación de toda la información disponible acerca sobre los tipos de procesos de transformación de la biomasa, la estequiometría del proceso, la fermentación en el proceso anaeróbico y los tipos de mezclas de la biomasa

La segunda fase comprende a cálculos matemáticos acerca las dimensiones necesarias que deben presentar los biodigestores así como la modelación y diseño de

un sistema de control que permita manipular las variables implícitas del proceso, previo a la construcción y montaje de la microplanta

La tercera fase corresponde a la entrega de la microplanta a los laboratorios del DECEM en un perfecto funcionamiento con los respectivos manuales de equipo y usuario

1.4 Justificación e Importancia

Al ser la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, una entidad pública, alineada con las políticas nacionales, una de sus líneas de investigación es el estudio de las energías alternativas, el mismo que se encuentra a cargo del laboratorio de energías renovables del DECEM. El estudio de las energías renovables permite al futuro ingeniero, profundizar sobre la realidad energética del país, y formular diversas soluciones para el problema energético, que se adapten a esta realidad.

Este trabajo implicará el diseño e implementación de una microplanta de biogás la cual poseerá un sistema de control automático que permita mantener la temperatura deseada en el sustrato, esto con el fin de monitorear el comportamiento de las demás variables que intervienen en el proceso como son el nivel de pH en el sustrato y presión generada por el biogás en el biodigestor, frente a una concentración de Carbón Nitrógeno que posea el sustrato.

Esto significa un aporte importante para la toma de decisiones en la implementación de proyectos de generación de energías renovables y limpias así como la reducción del impacto ambiental que llegan a producir los desperdicios orgánicos.

El biogás como fuente de energía alternativa presenta grandes ventajas entre las cuales se denotan:

- Es una fuente de energía renovable, de uso eficiente y de generación distribuida en el desarrollo rural.
- Ayuda en la descontaminación de residuos y reducción de contaminantes del suelo, aire y agua.
- Es un fertilizante natural, genera bioabono rico en nutrientes como el nitrógeno, fósforos, potasio o magnesio.
- Es una fuente de energía autoabastecible, ideal para el desarrollo de proyectos energéticos de comunas rurales aisladas de los servicios de distribución eléctrica convencional.

El proyecto rendirá beneficios directos e indirectos. Los beneficios directos son en dejar un equipo funcional al DECEM, con el cual puedan continuar con sus investigaciones en producción de biogás, facilitando así los estudios sobre el comportamiento de temperatura y pH, variables indispensables en el proceso de metanogénesis pudiéndose realizar con distintas muestras, y dejar un equipo experimental con el cual los docentes puedan mostrar a sus estudiantes de mejor manera el proceso de biodigestión. Los beneficios indirectos son en dejar un precedente para futuros proyectos de implementación en zonas rurales del país, pudiendo llegar a los lugares donde no llega la red eléctrica, y los combustibles fósiles tienen restricciones de venta como son las provincias fronterizas, donde se controla el tráfico de combustibles, para esto el diseño que se propone es un diseño pequeño y portable que puede ser adaptable a las necesidades de un hogar.

CAPITULO 2

BIODIGESTORES

Los biodigestores no son otra cosa que un recipiente cerrado el cual puede ser construido con diversos materiales como ladrillo y cemento, metal o plástico y donde se incorpora la materia orgánica para ser descompuesta por las bacterias metanogénicas y son empleados para la producción de biogás. (López M., 2011)

La producción de biogás en biodigestores a partir de la biomasa genera algunos beneficios como:

- Producción de biogás en forma controlada para suplir necesidades energéticas
- Reducción de la contaminación ambiental
- Estabilización de la materia orgánica para posibles procesos de compostaje o reciclaje posteriores.

2.1 Tipos de Digestores según su alimentación o carga

Los digestores según su alimentación o carga se clasifican en:

Digestores Continuos:

Son aquellos cuya alimentación es un proceso ininterrumpido, el efluente que descarga es igual al afluente o material de carga (que entra al digestor), con producciones de biogás, uniformes en el tiempo. Son utilizados principalmente para el tratamiento de aguas negras. Corresponde a plantas de gran capacidad, tipo industrial. (Roman, 2012)

Digestores semi continuos:

Estos digestores se caracterizan porque su primera carga consta de una gran cantidad de materias primas. Posteriormente, se agregan volúmenes de nuevas cargas de materias primas (afluente), calculados en función del tiempo de retención hidráulico (TRH) y del volumen total del digestor. Se descarga el efluente regularmente en la misma cantidad del afluente que se incorporó. Este proceso es usado en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico. (Roman, 2012)

Digestores discontinuos o de régimen estacionario

Estos tipos de digestores se cargan con las materias primas en una sola carga o lote. Después de un cierto período de fermentación, cuando el contenido de materias primas disminuye y el rendimiento de biogás decae a un bajo nivel, se vacían los digestores por completo y se alimentan de nuevo dando inicio a un nuevo proceso de fermentación. Esto se conoce también como digestores Batch. (Roman, 2012)

2.2 Digestores Tradicionales

Los Digestores tradicionales o también llamados de primera generación son aquellos cuyo diseño es orientado para el uso doméstico o rural cayendo en la categoría de los digestores semi-continuos de los cuales podemos denotar los siguientes:

2.3 Digestor Hindú o de campana flotante

El digestor hindú o de campana flotante fue desarrollado en India debido a la necesidad de contar con combustible para la calefacción en los hogares durante el invierno y para los tractores empleados en labores agrícolas, estos digestores trabajan a presión constante y su operación es muy fácil ya que fue diseñado para ser operado por campesinos con muy poca preparación académica. (López M., 2011)

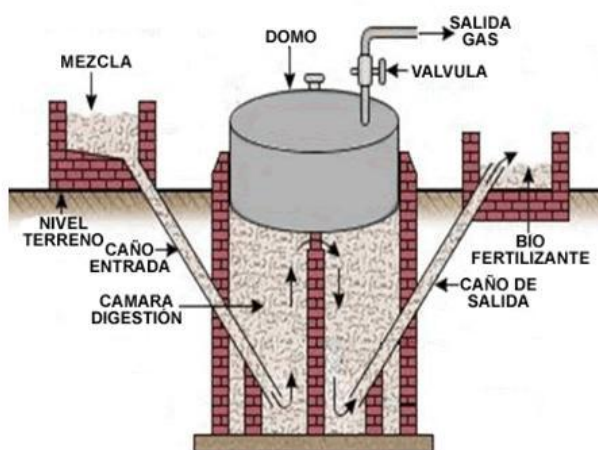


Figura 2.1 Digestor de tipo Hindú o de campana flotante

2.3.1 Digestor Chino o de campana fija

El digestor chino o de campana fija fue desarrollado por los chinos al ver los resultados del digestor hindú adoptando esta tecnología a sus propias necesidades, ya que China poseía un problema sanitario más que energético, este digestor funciona con presión variable y su objetivo primordial no es producir gas sino abono orgánico

ya procesado. De esta forma los chinos se deshicieron de las heces humanas en el área rural y al mismo tiempo obtuvieron abono orgánico, además de eliminar los malos olores y obtener gas para el consumo, en cocinas y alumbrado. (López M., 2011)

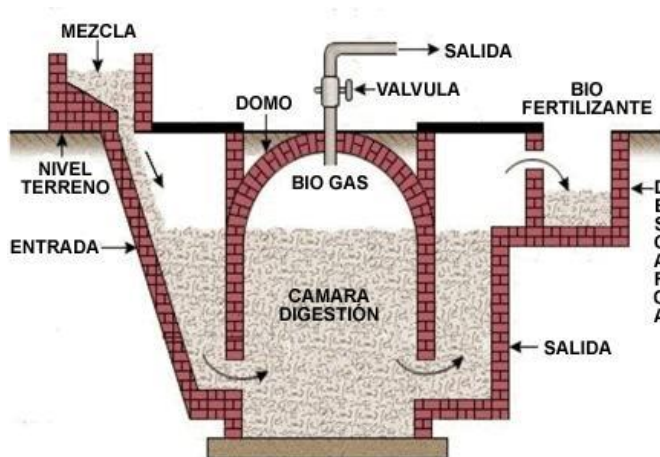


Figura 2.2 Digestor de tipo Chino o de campana fija

2.4 Digestores para procesos industriales

Este grupo comprende aquellos digestores que se han desarrollado en los últimos años con el fin de aumentar la concentración de biomasa activa para aumentar el rendimiento energético por unidad de volumen del digestor, son los comúnmente llamados Digestores de Segunda y Tercera Generación, sin embargo estos tipos de digestores por su configuración son empleados principalmente para el tratamiento de aguas residuales, por lo que no son muy aplicables para residuos ganaderos

El digestor de segunda generación opera básicamente en dos niveles. En la parte inferior se construye un túnel o laberinto, que sirve para retener temporalmente todos los materiales que tienden a flotar; con las divisiones internas se divide el laberinto en una serie de cámaras independientes pero comunicadas entre sí de forma continua. Por medio de planos inclinados y ranuras delgadas que conforman el techo del laberinto, se permite el paso del gas y del material ya hidrolizado y degradado. Los

materiales lentamente digeribles, que completan su ciclo de degradación anaeróbica en más de 100 días, pueden hacerlo al tiempo con excrementos que requieren mucho menos tiempo, entre 15 y 20 días.

El digester de tercera generación es la mezcla de varios digestores en una unidad. La técnica de laberinto que presenta es típico de los sistemas de Tapón o Bolsa, los cuales emplean longitudes efectivas de 20 a 30 metros, es el sistema más sencillo y práctico de todos los digestores de tipo convencional; las diferentes cámaras independientes (6 o más según el diseño) brindan las ventajas de los digestores de carga única; al final del recorrido y en la parte superior, se encuentra la última recámara, grande, que equivale al digester tipo Hindú, con su campana flotante, se carga por la parte inferior y la salida o efluente se hace por rebose en la parte superior. Este tipo de digester, ofrece una doble ventaja económica, ya que por un lado se construye una sola unidad de un tamaño adecuado a las necesidades, en lugar de varias unidades independientes más pequeñas; y por otro lado se elimina el costo de mano de obra necesaria para estar cargando y descargando periódicamente las unidades de carga única. (López M., 2011)



Figura 2.3 Digestor de Tipo Bolsa

2.5 Materias Primas para producción de Biogás

En general, se puede utilizar cualquier tipo de biomasa como sustrato (materia prima para la producción de biogás), teniendo siempre en cuenta que contenga carbohidratos, proteínas, grasas, celulosa y hemicelulosa como componentes principales. (Deublein & Steinhauser, 2011)

Tabla 2.1

Residuos orgánicos de diversos orígenes.

<i>Origen</i>	<i>Ejemplos</i>
<i>Residuos de origen animal</i>	<i>Estiércol, orina, guano, camas, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescados.</i>
<i>Residuos de origen vegetal</i>	<i>malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado</i>
<i>Residuos de origen humano</i>	<i>Heces, basura, orina.</i>
<i>Residuos agroindustriales</i>	<i>Salvado de arroz, orujos, cosetas, melazas, residuos de semillas.</i>
<i>Residuos forestales</i>	<i>Hojas, vástagos, ramas y cortezas.</i>
<i>Residuos de cultivos acuáticos</i>	<i>Algas marinas, jacintos y malezas acuáticas.</i>

Fuente: Varnero, 2011

Al seleccionar el tipo de sustrato se deben tener en consideración los siguientes parámetros:

- El contenido de materia orgánica debe ser apropiado para el proceso de fermentación seleccionado.
- El valor nutricional de la materia orgánica debe ser el máximo posible, ya que esto aumenta el potencial para la producción de biogás.
- El contenido de sustancias dañinas y basura debe ser mínimo, para no interferir con el proceso de fermentación.
- La composición del biogás debe ser apropiada para poder ser aprovechado.

- La composición del efluente debe permitir que el mismo pueda ser aprovechado como fertilizante.

Las sustancias con alto contenido de lignina no son directamente aprovechables y por lo tanto deben someterse a tratamientos previos (cortado, macerado, compostaje) a fin de liberar las sustancias factibles de ser transformadas de las incrustaciones de lignina. En el caso de estiércoles animales, la degradación de cada uno de ellos dependerá fundamentalmente del tipo de animal y la alimentación que hayan recibido los mismos. (Varnero, 2011)

2.5.1 Tipos de sustratos

Tabla 2.2

Clasificación de sustratos para la Digestión Anaeróbica

<i>Clase</i>	<i>Características</i>	<i>Tipo de Sustrato</i>	<i>Degradación</i>
1	Sólido	Basura Doméstica Estiércol Sólido Restos de Cosecha	Digestores tipo Batch o por lotes
2	Lodo altamente contaminado, alta viscosidad	Heces Animales	Digestores mezcla completa de operación continua.
3	Fluidos con alto contenido de sólidos suspendidos (SS)	Heces Animales de cría y levante diluido con agua de lavado Aguas residuales de mataderos	Digestores de alta eficiencia, como los de filtro anaerobio.
4	Fluidos muy contaminados, sólidos en suspensión	Aguas residuales de agroindustrias Aguas Negras	Digestores de alta eficiencia, como los de filtro anaerobio.

Para clasificar los sustratos en cuatro clases, se utilizan criterios como la apariencia física, nivel de dilución, grado de concentración y características cuantitativas, como el porcentaje de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y demanda química de oxígeno (DQO).

2.6 Acumuladores de Biogás

En todos los sistemas de producción de biogás es necesario incluir un acumulador, el mismo que se debe obtener en función de la producción máxima estimada, sin consumo del biogás.

La dispersión del consumo y su intensidad determinará el volumen de almacenamiento requerido. Por lo tanto cuanto más concentrado esté el consumo en un período de tiempo corto, mayor será la necesidad de almacenaje. Por lo general el volumen de almacenamiento no baja del 50% de la producción diaria. (Hilbert, 2003)

El tipo de acumulador puede ser de baja presión o de alta presión.

2.6.1 Acumuladores de baja presión

Los acumuladores de baja presión, llamados gasómetros almacenan el gas a la misma presión que se obtiene, y pueden ser de cuatro tipos:

- Los digestores totalmente cerrados almacenan el gas a volumen constante y presión variable, su capacidad es reducida y son muy poco usados.
- Los digestores con campana gasométrica que puede flotar sobre el líquido en fermentación o estar separado del digestor flotando sobre agua formando un sello hidráulico, muy usado en los reactores del tipo Hindú: en este caso el gas se almacena a presión constante (la que se puede variar colocando contrapesos sobre la campana) y a volumen variable.
- El tercer tipo posee una cúpula fija y una cámara de hidropresión que permite el desplazamiento del sustrato en fermentación a medida que se acumula el gas, este sistema es muy empleado en los digestores de tipo Chino; en este caso el gas se almacena a volumen y a presión variables.

- Por último se han difundido en años recientes almacenadores de gas del tipo gasómetro plástico inflable. Este contenedor plástico puede cubrir el digestor en su parte superior como una campana o estar separado, almacenado a presión constante y volumen variable. En este tipo también se puede variar la presión de la misma forma que en el de campana gasométrica. (Hilbert, 2003)

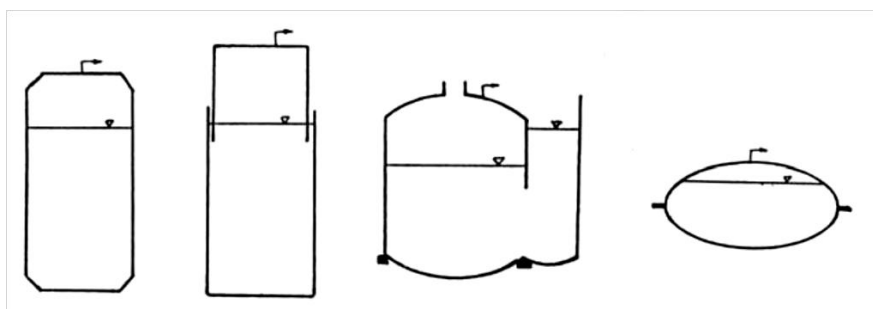


Figura 2.4 Tipos de Gasómetros.

Fuente: (Hilbert, 2003)

2.6.2 Acumuladores de alta presión

A fin de reducir el volumen de almacenaje necesario se puede comprimir el gas y almacenarlo a presiones medias (0,5 a 1,5 bar) y altas hasta 300 bar. Para poder almacenar el gas en recipientes de alta presión es necesario un gasto de energía para comprimirlo. Y se lo debe pasar por una serie de filtros para eliminar el vapor de agua, CO₂ y H₂S. Los recipientes para altas presiones generalmente son cilindros o esferas, y deben tener una alta rigidez estructural para soportar la presión interna del gas.

El almacenaje a estas presiones se utiliza generalmente cuando se emplea el gas, como combustible de vehículos, donde el volumen ocupado es importante. (Hilbert, 2003)

2.7 Selección de Alternativas

En lo referente a lo establecido y tomando en cuenta que el presente proyecto es el diseño y construcción de una microplanta generadora de biogás la cual funcionara en los laboratorios del DECEM y el propósito fundamental es que sea capaz de procesar y caracterizar diferentes tipos de sustratos se muestra a continuación la selección de nuestro digestor:

Tabla 2.3

Selección de alternativas para el biodigestor

Parámetro	Tipo	Ventajas
<i>Digestor</i>	<i>Discontinuo o Régimen estacionario</i>	<ul style="list-style-type: none"> – <i>Requieren de una sola carga o lote para arrancar con el proceso de fermentación</i> – <i>Ideales para procesos de investigación, donde no se tenga una fuente de materia orgánica para su alimentación constante</i> – <i>Construcción más simple y mayor facilidad para el monitoreo y control de los parámetros del proceso</i>
<i>Materia Prima</i>	<i>Residuos de origen animal y vegetal</i>	<ul style="list-style-type: none"> – <i>Son materias cuya biodegradación es a corto plazo</i> – <i>Mayor abundancia de dicho material en el medio</i> – <i>Ricos en porcentajes de carbón y nitrógeno, por lo que permiten un sin número de mezclas</i>
<i>Tipo de sustrato</i>	<i>Clase 1: Solidos</i>	<ul style="list-style-type: none"> – <i>Muy empleados en digestores de tipo batch con excelentes resultados</i>
<i>Acumulador de Biogás</i>	<i>Gasómetro plástico inflable</i>	<ul style="list-style-type: none"> – <i>Son capaces de almacenar el biogás a presión constante y volumen variable</i> – <i>Pueden ir sobre el propio digestor o estar separado de él</i> – <i>Permiten la presencia de filtros para la eliminación de gases nocivos para el operario (Ácido sulfhídrico)</i>

CAPITULO 3

BIODIGESTION ANAEROBIA

3.1 Etapas del Proceso de Fermentación Anaeróbica

Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso y la fermentación de la siguiente manera (Guevara, 1996):

Las discrepancias existentes en la bibliografía, se deben a que las etapas del proceso no son secuenciales, sino que ocurren todas a la vez, pudiendo los microorganismos de una etapa, usar los subproductos de otra para sus reacciones.

3.1.1 Periodo de producción de ácidos (I)

La materia orgánica es atacada por un grupo de bacterias fermentativas, Proteólicas, Celulolíticas, que la degradan hasta ácidos grasos y compuestos neutros. Etapa en la que hay producción intensiva de ácidos (acidificación), empieza con la descomposición de grasas y hay gran producción de bióxido de carbono (CO_2) y ácido sulfhídrico (H_2S), el pH se encuentra en zona ácida (5.1 a 6.8).

3.1.2 Período de digestión de ácidos (II)

En esta etapa las bacterias atacan a los ácidos orgánicos y compuestos nitrosos, existe producción de CO_2 , N , H , bicarbonatos y compuestos amoniacales, mal olor causado por H_2S , gran parte de los sólidos se encuentran flotando, el pH se encuentra entre 6.6 y 6.8

3.1.3 Período de digestión intensiva o fermentación alcalina (III)

Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de: acetato, H_2/CO_2 , formato, metanol y algunas metilaminas. (Varnero, 2011). Presencias de pequeñas cantidades de sólidos flotantes, el pH se encuentra en la zona alcalina de 6.9 a 7.4.

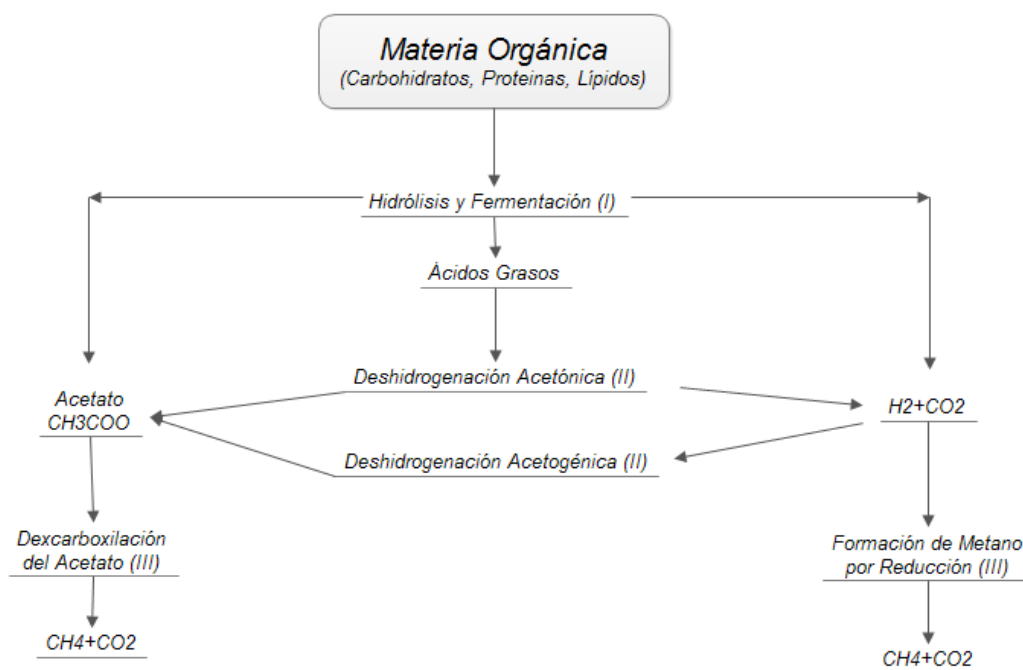


Figura 3.1 Etapas de la Fermentación Anaeróbica

Fuente: (Guevara, 1996)

Nota: Para que un proceso de fermentación se realice en forma normal es necesario contar con la acción conjunta y combinada de bacterias que produzcan

metano y que no produzcan metano. La falta o exceso de cualquier grupo de bacterias producirá complicaciones o fallos en la fermentación (Guevara, 1996)

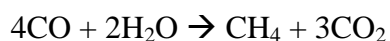
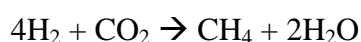
3.2 Estequiometria del Proceso

Si se entiende que la estequiometría es la parte de la química que se encarga de determinar las cantidades de masa que emplean las sustancias presentes en una reacción química, en esta sección se denotarán las diferentes reacciones que se dan en la etapa de metanogénesis en la digestión Anaeróbica.

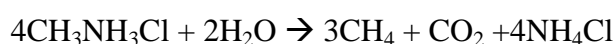
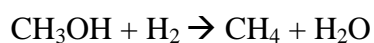
Las bacterias metanogénicas o metanógenos (Grupo de arqueobacterias anaeróbicas) solo pueden usar un número limitado de sustratos para la formación de metano, estos son: CO₂, H₂, acetato, metanol, metilmercaptano, metilamina, y monóxido de carbono.

A continuación se mencionan los tipos de sustratos que se convierten en metano por la acción de uno u otro metanógeno. (Carrillo, 2003)

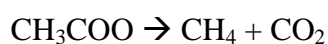
Sustratos del tipo CO₂



Sustratos con grupo metilo



Sustrato de acetotróficas



En la fermentación anaerobia, las dos rutas principales en la formación de metano son:

Primero, la conversión de dióxido de carbono y del hidrógeno en metano y agua tal y como se indica a continuación:



Donde:

$\text{H}_2 \rightarrow$ Hidrogeno

$\text{CO}_2 \rightarrow$ Dióxido de Carbono

$\text{CH}_4 \rightarrow$ Metano

$\text{H}_2\text{O} \rightarrow$ Agua

Y segundo, la conversión del formiato y del acetato en metano, dióxido de carbono y agua:



Donde:

$\text{HCOOH} \rightarrow$ Formiato o ácido fórmico.

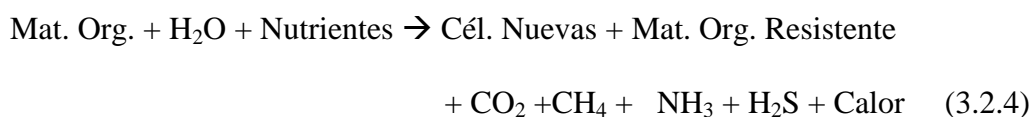
$\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow$ Acetato o ácido acético

Las bacterias metanogénicas y acidogénicas (metanógenos y acidógenos) forman una relación simbiótica por la cual los metanógenos convierten los productos finales de la fermentación (por ejemplo, hidrógeno, formiato y acetato) en metano y dióxido de carbono.

Los metanógenos utilizan el hidrogeno producido por lo acidógenos (gracias a la acción de la hidrogenasa) para la formación de productos oxidados (formiato y acetato). Este proceso se llama transferencia de hidrogeno entre especies, por lo que

los metanógenos separan compuestos que disminuyen el funcionamiento de los acidógenos.

En base a estos procesos y adicionalmente a los factores ambientales a los cuales se somete este proceso de biodigestión (temperatura, pH), la transformación anaeróbica general de la materia orgánica puede describirse mediante la siguiente ecuación (López M., 2011)



Donde:

$\text{NH}_3 \rightarrow$ Amoníaco.

$\text{H}_2\text{S} \rightarrow$ Ácido Sulhídrico.

3.3 Condiciones del Proceso

La digestión en lodos es un proceso de descomposición anaeróbica que consiste en degradar la materia orgánica en ausencia de oxígeno para producir metano (CH_4), bióxido de carbono (CO_2) etc. En las cuales participan una gran variedad de microorganismos productores y no productores de metano, por lo que es razonable en pensar que existen diversos factores o condiciones que son capaces de afectar ya sea de forma favorable o en contra de la dinámica del proceso.

A continuación detallaremos las condiciones más fundamentales que se deben tener muy en cuenta a la hora de realizar el proceso de digestión:

3.3.1 Material de carga para la fermentación

El material de carga es todo tipo de desecho orgánico que puede ser usado para la degradación los cuales se pueden dividir en dos grandes grupos:

- Materia prima rica en nitrógeno: Donde el nitrógeno (N) se usa como constituyente para la formación de estructura celular.
- Materia prima rica en carbono: Donde el carbono (C) se usa como fuente de energía.

Los microbios siempre consumen estos elementos en determinadas proporciones los cuales son medidos por la relación C/N que llegan a contener las materias orgánicas, entendiéndose que dichos porcentajes influyen en la dinámica del proceso de la siguiente manera:

- Materias ricas en carbono producen mayor cantidad de biogás
- Materias ricas en nitrógeno poseen mejor velocidad de biodegradación, en los primeros 10 días de degradación producen del 34% al 46% del biogás total en comparación a las ricas en carbono que producen del 8% a 9% del biogás total.

Recordando lo anteriormente mencionado sobre como el porcentaje de carbono y nitrógeno influyen en la cantidad y el tiempo de generación del biogás es recomendable combinar proporciones adecuadas de materiales con altos y bajos rendimientos así como con distintas velocidades de generación con el fin de conseguir un buen rendimiento de biogás de manera constante.

La relación C/N se puede calcular de la siguiente manera:

$$K = \frac{C_1X_1 + C_2X_2}{N_1X_1 + N_2X_2} = \frac{\sum C_iX_i}{\sum N_iX_i} \quad (3.3.1)$$

En donde:

- K : C/N de la mezcla de las materias primas
- C : Porcentaje de carbono en la materia prima
- N : Porcentaje de nitrógeno en la materia prima

X: Peso de la materia prima

Existen muchos criterios en lo referente a esta relación, sin embargo se reconoce como aceptable emplear una relación de 20:1 – 30:1 (Guevara, 1996)

Tabla 3.1

Porcentaje de carbono y nitrógeno en la fermentación anaeróbica

<i>Tipos de Sustratos</i>	<i>Carbono % (seco)</i>	<i>Nitrógeno % (seco)</i>	<i>C/N</i>
<i>Vacunos</i>	32	1,5	21,33
<i>Ovinos</i>	60	3,7	16,22
<i>Equinos (caballos, mullas, bueyes)</i>	47	2,4	19,58
<i>Porcino</i>	73	2,6	28,08
<i>Gallinaza</i>	70,2	5,9	11,9
<i>Auquénidos</i>	42	3,7	11,35
<i>Cuyes</i>	37,2	2,22	16,76
<i>Conejos</i>	47,2	2,02	23,37
<i>Chala de maíz</i>	39	0,7	55,71
<i>Paja de arroz</i>	41,2	0,7	58,86
<i>Paja de cebada</i>	42	0,88	47,73
<i>Paja de trigo</i>	46	0,53	86,79
<i>Totorales</i>	41	0,23	178,26
<i>Hojas de plátano</i>	42	1,1	38,18
<i>Pasto</i>	40	2,52	15,85
<i>Hierbas y hojas secas</i>	41	1	41
<i>Sangre de animal</i>	50,5	13,8	3,66

Fuente: (ININTAE, 1983) (ECN Phyllis 2 Database for biomass and waste, 2012)

3.3.2 Concentración de la carga

Para la producción de biogás no es conveniente que la concentración de la carga a degradar este muy concentrada ni muy diluida, se recomienda una concentración de 8-10%.

Mediante la base de solidos totales que poseen las cargas se puede calcular la concentración de los lodos, la cantidad de agua que se necesita añadir a la carga y las proporciones de los componentes para mantener una concentración ideal en nuestra carga

Para la determinación del volumen de agua necesario para la concentración diluida tenemos (Varnero, 2011)

$$\%S.T. (carga diluida) = \frac{1 \text{ kg excreta fresca} * \%S.T. (excreta fresca)}{1 \text{ kg excreta fresca} + V_{\text{agua}}} \quad (3.3.2)$$

Dónde:

S.T.: Sólidos totales de la carga.

Los cuales se pueden determinar experimentalmente a través de la humedad de la biomasa o a su vez hacer usos de equipos especializados en la determinación de la humedad para materiales orgánicos.

Tabla 3.2

Porcentaje de humedad y sólidos totales de desechos utilizados en la fermentación anaeróbica

<i>Tipos de Sustratos</i>	<i>Carbono % (seco)</i>	<i>Nitrógeno % (seco)</i>	<i>C/N</i>
<i>Vacunos</i>	32	1,5	21,33
<i>Ovinos</i>	60	3,7	16,22
<i>Equinos (caballos, mullas, bueyes)</i>	47	2,4	19,58
<i>Porcino</i>	73	2,6	28,08
<i>Gallinaza</i>	70,2	5,9	11,9
<i>Auquénidos</i>	42	3,7	11,35
<i>Cuyes</i>	37,2	2,22	16,76
<i>Conejos</i>	47,2	2,02	23,37
<i>Chala de maíz</i>	39	0,7	55,71
<i>Paja de arroz</i>	41,2	0,7	58,86
<i>Paja de cebada</i>	42	0,88	47,73
<i>Paja de trigo</i>	46	0,53	86,79
<i>Totorales</i>	41	0,23	178,26
<i>Hojas de plátano</i>	42	1,1	38,18
<i>Pasto</i>	40	2,52	15,85
<i>Hierbas y hojas secas</i>	41	1	41
<i>Sangre de animal</i>	50,5	13,8	3,66

Fuente: ININTAE, 1983

Cabe recalcar que el volumen de agua necesario para alcanzar la concentración requerida es para 1kg de masa orgánica por lo que se tendrá que multiplicar dicho valor por la masa total que se desea fermentar.

3.3.3 Temperatura

Es uno de los factores que tiene mayor relevancia en los procesos anaeróbicos, ya que a medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás.

Existen tres rangos de temperatura en los que se pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos (Tabla 3.3).

Tabla 3.3

Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica. (Varnero, 2011)

<i>Fermentación</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Óptimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Tiempo de fermentación</i>
<i>Psycrophilica</i>	4-10 °C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
<i>Mesophilica</i>	15-20 °C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
<i>Thermophilica</i>	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo para el cual la tasa de crecimiento metanogénica se hace máxima, determinando así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de operación (Figura 3.2).

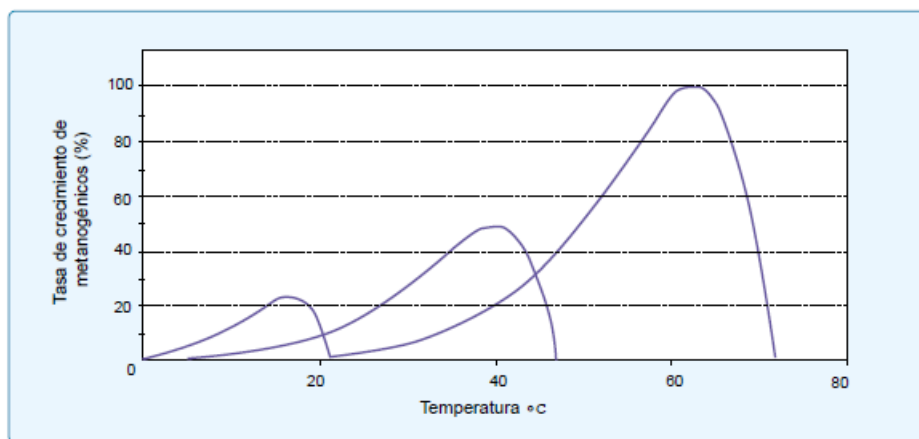


Figura 3.2 Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilos, mesófilos y termófilos.

Fuente: Varnero, 2011

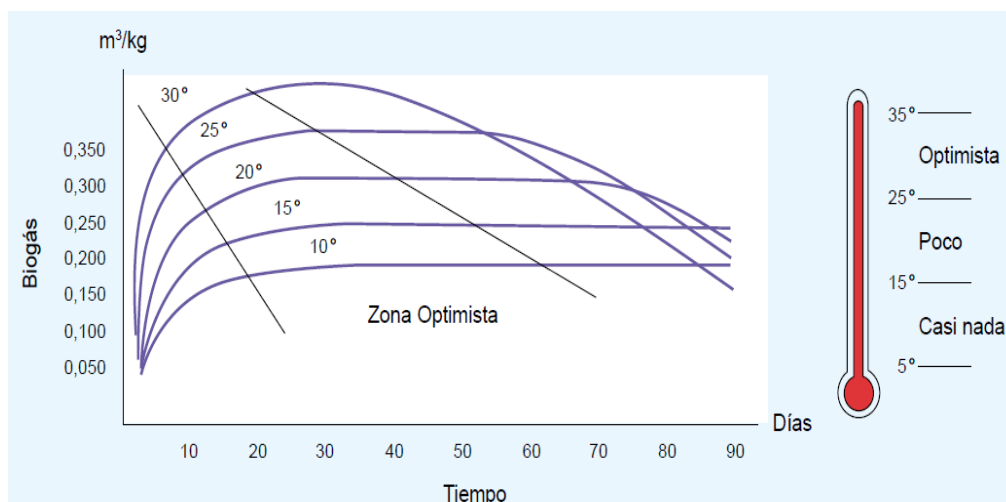


Figura 3.3 Producción de biogás en función de la temperatura

Fuente: Varnero, 2011

Finalmente se ha determinado que el ciclo digestivo al ser más rápido en altas temperaturas, determina que la capacidad del digestor debe ser mayor a menores temperaturas que a altas temperaturas, adicional a esto como regla general la actividad biológica se duplica cada incremento de 10°C dentro de los rangos de temperatura óptimos (Figura 3.3)

Por lo que para un óptimo funcionamiento del digestor, se recomienda que el tratamiento anaeróbico se diseñe en lo posible con un control de temperatura el cual opere con variaciones de temperatura que no excedan entre los 0.6 -1.2°C por día

3.3.4 Valor del PH

El valor óptimo para la digestión metanogénica es de 6.5 – 7.5, menor que 5 o mayor que 8 puede inhibir el proceso de fermentación o incluso llegar a detenerlo. Normalmente cuando se trabaja con residuos domésticos y agropecuarios la dinámica del proceso ajusta el pH; sin embargo el pH puede ser corregido como:

- Sacando frecuentemente una pequeña cantidad del efluente o sustrato y agregando materia prima en la misma cantidad y de forma simultanea
- Agregando fertilizantes, agua amoniacal diluida, licor fermentado, soluciones alcalinas o ácidas según sea el caso

3.3.5 Promotores o inhibidores de la fermentación

Promotores: Son materiales que pueden fomentar la degradación del material y aumentar la producción del biogás pudiendo ser: enzimas, sales inorgánicas, urea (acelera la producción del metano y degradación del material), carbonato de calcio (ayuda en la generación del biogás y aumenta el contenido de metano en el mismo)

Inhibidores: Son elementos o factores que afectan la actividad de los microorganismos como puede llegar hacer la alta concentración de ácidos volátiles, más de 2000ppm en la fermentación Mesofílica y 3600ppm en la fermentación Thermofílica puede llegar a destruir completamente el proceso de digestión.

Tabla 3.4

Concentración de inhibidores comunes

<i>Inhibidores</i>	<i>Concentración inhibidora</i>
<i>SO₄</i>	<i>5000 ppm</i>
<i>NaCl</i>	<i>40000 pm</i>
<i>Nitrato (Según el contenido de nitrógeno)</i>	<i>0,05 mg/ml.</i>
<i>Cu</i>	<i>100 mg/l.</i>
<i>Cr</i>	<i>200 mg/l.</i>
<i>Ni</i>	<i>200-500 mg/l.</i>
<i>CN</i>	<i>25 mg/l.</i>
<i>Detergente sintético</i>	<i>20-40 mg/l.</i>
<i>Na</i>	<i>3500-5500 mg/l.</i>
<i>K</i>	<i>2500-4500 mg/l.</i>
<i>Ca</i>	<i>2500-4500 mg/l.</i>

Fuente: Guevara, 1996

3.4 Características del Biogás

El biogás es un subproducto de la biodigestión anaerobia, el mismo que consiste principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene varias impurezas. El biogás es inflamable si su contenido de metano es superior al 45%. (Deublein & Steinhauser, 2011).

El biogás posee una temperatura de inflamación de alrededor de 700°C y su temperatura de llama alcanza los 870 °C. Su pureza y calidad dependen de la cantidad de metano que contenga; cuanto mayor es el porcentaje de este gas, más puro y mayor su poder calorífico. (López M., 2011)

El biogás tiene en promedio un poder calorífico entre 3.500 a 4.600 (cuatro mil seiscientos) kilocalorías por metro cúbico. Este gas se puede utilizar para producir energía eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras a gas, en hornos, estufas, secadores, calderas u otros sistemas de combustión a gas, debidamente adaptados para tal efecto. (Ramos & Hernandez, 2007)

Tabla 3.5

Componentes típicos del biogás y sus efectos (Deublein & Steinhauser, 2011)

<i>Componente</i>	<i>Contenido</i>	<i>Efectos</i>
CO_2	25-50%	Reduce el poder calórico del gas Produce corrosión si el gas está húmedo Daña pilas o celdas de combustible alcalinas Efecto corrosivo en equipamiento y sistemas de tuberías: la mayoría de fabricantes recomiendan un límite máximo de 0,05% por unidad de volumen
H_2S	0 0,5%	Produce emisiones de SO_2 producto de la combustión, o emisiones de H_2S con combustión imperfecta causa corrosión en los equipos y sistemas de tuberías
Vapor de agua	1 - 5%	El vapor condensado puede dañar sistemas de instrumentación Existe riesgo de congelamiento de tuberías y toberas
NH_3	0 - 0,05%	Las emisiones de NO_x después de la combustión causan daño a las celdas de combustible Previene el autoencendido en motores de combustión interna
Polvo	> $5\mu m$	Bloquea válvulas y toberas Disminuye el potencial calórico
N_2	0-5%	Previene el autoencendido en motores de combustión interna
Siloxanos	0 - $50mgNm^{-3}$	Actúa como abrasivo causando daño en motores.

Fuente: Deublein & Steinhauser, 2011

Tabla 3.6

Energía equivalente (Valor Energético) Biogás Vs. otras fuentes (Varnero, 2011)

<i>Valores</i>	<i>Biogás</i>	<i>Gas Natural</i>	<i>Gas Propano</i>	<i>Gas Metano</i>	<i>H_2</i>
Poder Calorífico [KWh/m^3]	7.0	10	26	10	3
Densidad nominal [g/m^3]	1.08	0.7	2.01	0.72	0.09
Densidad relativa [g/m^3]	0.81	0.54	1.51	0.55	0.07
Límite de explosión (% de gas en el aire)	42344	42125	42279	42125	29312
Temperatura de Encendido	687	650	470	650	585
Máxima velocidad de encendido en el aire [m/s]	0.31	0.39	0.42	0.47	0.43
Requerimiento teórico de aire [m^3/m^3]	6.6	9.5	23.9	9.5	2.4

Composición promedio del biogás: CH_4 (65%) – CO_2 (35%)

La presión adecuada para un óptimo uso del biogás oscila entre los 7 y los 20 mbar, y la cantidad de aire mínima recomendada para su combustión es del 21%. En la tabla 2 se encuentra una comparación las características del biogás respecto de otros gases combustibles. (Varnero, 2011)

3.5 Tipos de Mezclas

Se pueden realizar distintas mezclas, para el tratamiento conjunto de residuos orgánicos. A esta práctica también se le conoce como co-digestión y tiene las siguientes ventajas (IDAE, 2007):

- Aprovechar la complementariedad de las composiciones, (relación C:N, porcentaje de sólidos totales, PH, etc.) compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado.
- Compartir instalaciones de tratamiento.
- Amortiguar las variaciones de tiempo en composición y producción de cada residuo por separado.
- Reducir costos de inversión y explotación.

En general las mezclas se componen de un sustrato animal y un vegetal (ver tabla 3), ya que de esta manera se logra equilibrar las propiedades de los mismos.

Las plantas industriales en ocasiones tienen biodigestores donde se mezclan los desechos industriales con sustratos tradicionales para equilibrar el PH.

Tabla 3.7

Formulaciones para preparación del sustrato

<i>Sustrato</i>	<i>KG</i>	<i>Sustrato</i>	<i>KG</i>	<i>Proporción</i>
<i>Estiércol de vacuno</i>	2166	<i>Chala de maíz</i>	387	0,85 - 0,15
<i>Estiércol de vacuno</i>	2275	<i>Pajas de arroz</i>	333	0,87 - 0,13
<i>Estiércol de vacuno</i>	2038	<i>Pajas de Cebada</i>	383	0,84 - 0,16
<i>Estiércol de vacuno</i>	2610	<i>Pajas de trigo</i>	257	0,91 - 0,09
<i>Estiércol de vacuno</i>	1714	<i>Hierbas y hojas secas</i>	842	0,67 - 0,33
<i>Estiércol de equino</i>	1312	<i>Chala de maíz</i>	631	0,68 - 0,32
<i>Estiércol de equino</i>	1404	<i>Pajas de arroz</i>	470	0,75 - 0,25
<i>Estiércol de equino</i>	1204	<i>Pajas de Cebada</i>	525	0,7 - 0,3
<i>Estiércol de equino</i>	1712	<i>Pajas de trigo</i>	387	0,82 - 0,18
<i>Estiércol de equino</i>	960	<i>Hierbas y hojas secas</i>	1060	0,48 - 0,52
<i>Gallinaza</i>	214	<i>Chala de maíz</i>	781	0,22 - 0,78
<i>Gallinaza</i>	243	<i>Pajas de arroz</i>	704	0,26 - 0,74
<i>Gallinaza</i>	193	<i>Pajas de Cebada</i>	727	0,21 - 0,79
<i>Gallinaza</i>	332	<i>Pajas de trigo</i>	650	0,34 - 0,66
<i>Gallinaza</i>	141	<i>Hierbas y hojas secas</i>	766	0,16 - 0,84
<i>Estiércol de auquénido</i>	377	<i>Chala de maíz</i>	732	0,34 - 0,66
<i>Estiércol de auquénido</i>	342	<i>Pajas de Cebada</i>	692	0,33 - 0,67
<i>Estiércol de auquénido</i>	558	<i>Pajas de trigo</i>	591	0,49 - 0,51
<i>Estiércol de auquénido</i>	251	<i>Hierbas y hojas secas</i>	1352	0,16 - 0,84
<i>Porcino</i>	1977	<i>Chala de maíz</i>	204	0,91 - 0,09
<i>Porcino</i>	2530	<i>Pajas de arroz</i>	170	0,94 - 0,06
<i>Porcino</i>	1916	<i>Pajas de Cebada</i>	205	0,9 - 0,1
<i>Porcino</i>	2206	<i>Pajas de trigo</i>	122	0,95 - 0,05
<i>Porcino</i>	2200	<i>Toctorales</i>	157	0,93 - 0,07
<i>Porcino</i>	1738	<i>Hierbas y hojas secas</i>	491	0,78 - 0,22

Basado en COMO CONSTRUIR UN BIODIGESTOR pag 28. Biblioteca de CITECNIA CORP

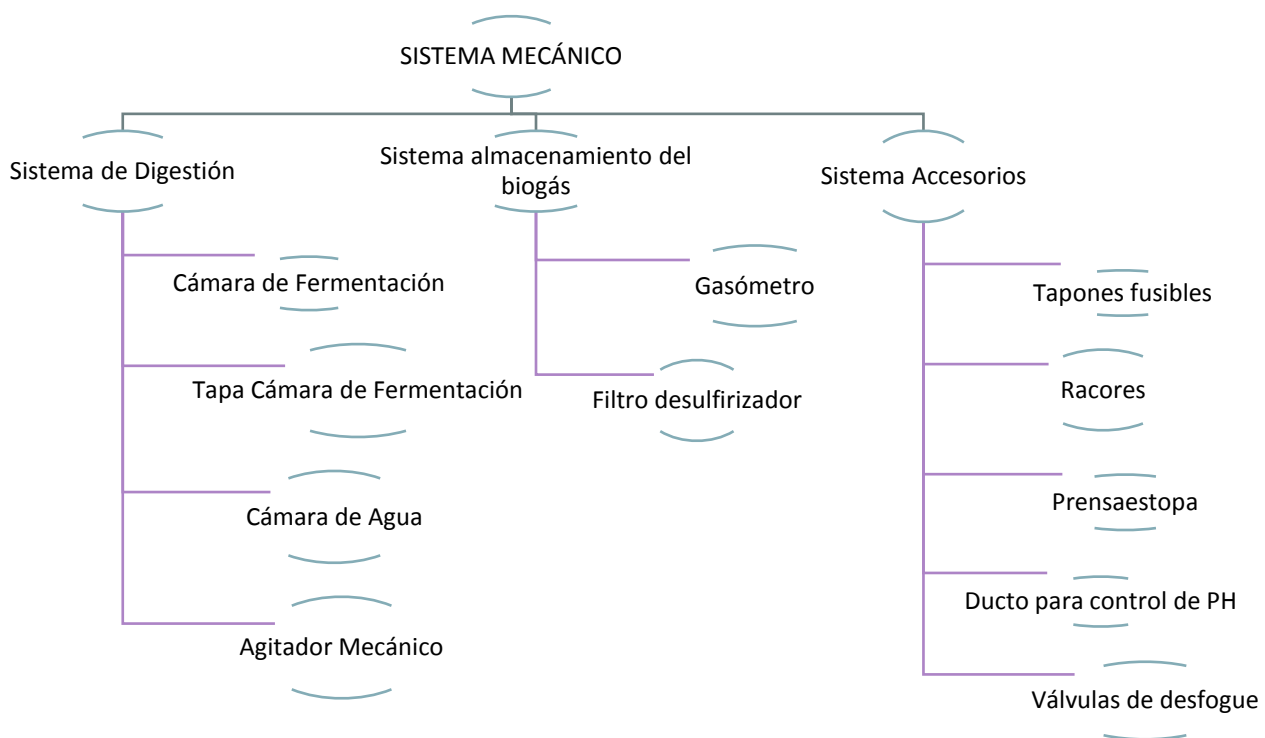
CAPITULO 4

DISEÑO MECATRÓNICO

4.1 Diseño Mecánico

Cuadro 4.1

Elementos del Sistema Mecánico



4.1.1 Sistema de Digestión

Este sistema es el encargado de almacenar el sustrato durante el proceso de fermentación, está conformado por:

4.1.1.1 Cámara de Fermentación o Cuerpo del Digestor:

Es una cámara hermética donde reposará la mezcla durante determinado período de tiempo y se dará lugar a la actividad microbacteriana para la generación del biogás, el biosol y el biol; para el cálculo de las dimensiones apropiadas de dicha CF (Cámara de Fermentación) se lo realiza a partir de los siguientes datos:

Para obtener una cantidad de biogás producido que sea viable de caracterización es recomendable tener como mínimo en peso de 5kg de mezcla.

La densidad y peso específico de la materia a procesar es fundamental al momento de determinar los sistemas de pre-recogida (volumen de los recipientes de residuos en hogares e industrias), los sistemas de recogida (capacidades necesarias de los equipos de recogida y transporte de residuos) y los sistemas de tratamiento (plantas de reciclaje, vertederos, incineradoras, etc.) (Gestion Integral de Residuos, 2010)

Tabla 4.1

Peso específico de las fracciones de RSU (Residuos Sólidos Urbanos)

<i>Componentes</i>	<i>Variación en kg/m3</i>	<i>Típico en kg/m3</i>
<i>Materia Orgánica en hogares</i>	<i>131-481</i>	<i>291</i>
<i>Materia Orgánica en Industrias</i>	<i>475-950</i>	<i>540</i>
<i>Residuos de jardinería</i>	<i>59-225</i>	<i>101</i>
<i>Madera</i>	<i>131-320</i>	<i>237</i>
<i>Papel y Cartón</i>	<i>42-131</i>	<i>50</i>
<i>Plásticos</i>	<i>42-131</i>	<i>65</i>
<i>Textiles</i>	<i>42-101</i>	<i>65</i>
<i>Vidrio</i>	<i>160-481</i>	<i>196</i>
<i>Latas de hojalata</i>	<i>50-160</i>	<i>89</i>
<i>Otros metales</i>	<i>65-1,151</i>	<i>280</i>

Para la estimación del digestor a construir, se hace uso de los valores del peso específico de los dos primeros componentes de la tabla 4.1:

$$Pe = \frac{291 + 540}{2} = 415.5 \frac{kg}{m^3}$$

La cantidad de agua añadir es fundamental y depende mucho del tipo de mezcla a tratar, sin embargo de forma tradicional se ha establecido que entre los kilogramos de mezcla y los litros de agua a añadir son de 1:2 para mezclas cuya principal materia sean residuos orgánicos de carácter animal, y para mezclas cuya principal materia sean residuos orgánicos vegetales es de 1:4 (Olaya A. Y., 2009)

Para el presente diseño, se toma una relación 1:3 que es el promedio de las dos relaciones descritas anteriormente, sin embargo al momento de realizar los ensayos y pruebas se puede ser más específico y determinar una cantidad acorde de agua partiendo del porcentaje de humedad de la mezcla.

La fórmula para calcular el volumen de la CF es:

$$V_{CF} = \frac{W}{Pe} + V_{agua} \quad (4.1.1)$$

$$V_{agua} = \frac{n \cdot W}{1000} \quad (4.1.2)$$

Dónde:

W: Peso de la mezcla o sustrato a procesar (kg).

Pe: Peso específico de la mezcla o sustrato a procesar ($\frac{kg}{m^3}$)

V_{agua} : Volumen de agua necesaria para el proceso de fermentación m^3 .

n: Factor de relación entre kilogramos de sustrato y litros de agua

$$V_{agua} = \frac{3 \cdot 5}{1000} = \frac{3}{200} m^3$$

$$V_{CF} = \frac{5kg}{415,5 \frac{kg}{m^3}} + \frac{3}{200}$$

$$V_{CF} = 0,027m^3$$

En base a este volumen se optimiza las medidas óptimas de radio y altura con el fin de emplear la menor área posible:

$$V_{cilindro} = \pi * r^2 * h \quad (4.1.3)$$

$$A_{cilindro} = 2 * \pi * r * h + \pi * r^2 \quad (4.1.4)$$

Reemplazando el valor del volumen de la CF y despejando la altura de la fórmula de volumen y reemplazando en la fórmula del área se obtiene:

$$A(r) = \frac{2 * 0,027}{r} + \pi * r^2$$

Derivando $A(r)$ e igualando a 0:

$$\frac{dA(r)}{dr} = -\frac{0,054}{r^2} + 2 * \pi * r$$

$$-\frac{0,054}{r^2} + 2 * \pi * r = 0$$

$$r = 0.204m$$

Reemplazando en la fórmula del volumen del cilindro para determinar la h :

$$h = \frac{0,027}{\pi * 0.204^2}$$

$$h = 0.207$$

De donde se obtiene una relación h/d de 0.5.

En la literatura previa no se ha encontrado una relación específica entre la altura y el diámetro del digestor; por tanto se toma en cuenta las relaciones h/d de ciertos digestores tipo batch ya construidos por otros autores, y se establece una relación de apropiada de 1.2 a 1.4. (López M., 2011)

Por consiguiente se ajusta las medidas del digestor obtenido para que la relación h/d caiga dentro de los rangos anteriormente mencionados:

Tabla 4.2

Cálculo de alturas, h/d , y áreas en función de nuevos radios

<i>Radio m</i>	<i>Altura m</i>	<i>h/d</i>	<i>Área m²</i>
0,204	0,207	0,51	0,395
0,2	0,215	0,54	0,396
0,19	0,238	0,63	0,398
0,18	0,265	0,74	0,402
0,17	0,297	0,87	0,408
0,16	0,336	1,05	0,418
0,15	0,382	1,27	0,431
0,14	0,438	1,57	0,447

Como se puede apreciar en la tabla 4.2 para un radio de 0.15 m se tiene una altura apropiada que cumple con la relación recomendada.

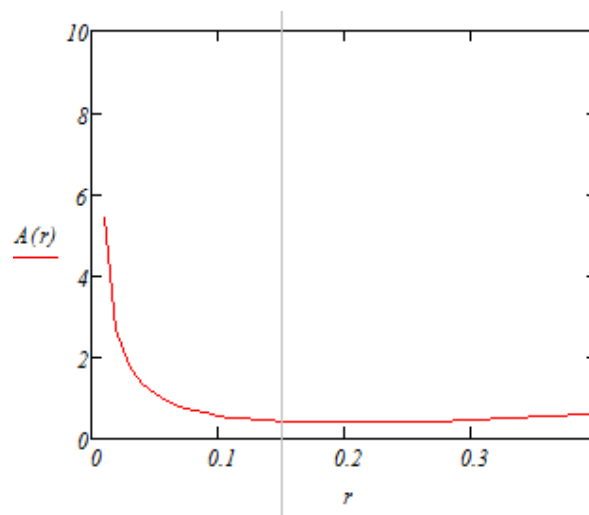


Figura 4.1 Relación del área en función del radio

En la figura 4.1 se puede apreciar que el área total del cilindro, difiere en un 9.11% del área óptima, lo que se considera aceptable.

Por consiguiente la altura y el diámetro de la CF a construir serán: 0.44 m y 0.30 m respectivamente (Figura 4.2), se añadirá 5 cm a la altura del cilindro con el fin de tener un espacio en el cual se almacenará el biogás producido.



Figura 4.2 Cámara de Fermentación (CF)

4.1.1.2 Tapa de la Cámara de Fermentación

La tapa de la CF es una lámina de acero inoxidable del mismo diámetro que la CF, y 6 mm de espesor. Lleva un sello de espuma para su ajuste hermético y varios agujeros para instrumentación detallados en la tabla 4.3.

Tabla 4.3

Detalle de agujeros en la tapa de la CF

<i>Cantidad</i>	<i>Finalidad</i>	<i>Diámetro</i>
1	salida del agitador mecánico	1 "
1	Acople para manómetro	1/2 "
1	Acople para sensor de presión	1/2 "
2	Acople para sensores de temperatura	1/2 "
1	Acople para sensor de PH	1/2 "
1	Salida del biogás	1/2 "
1	ducto para control de PH	1/2 "

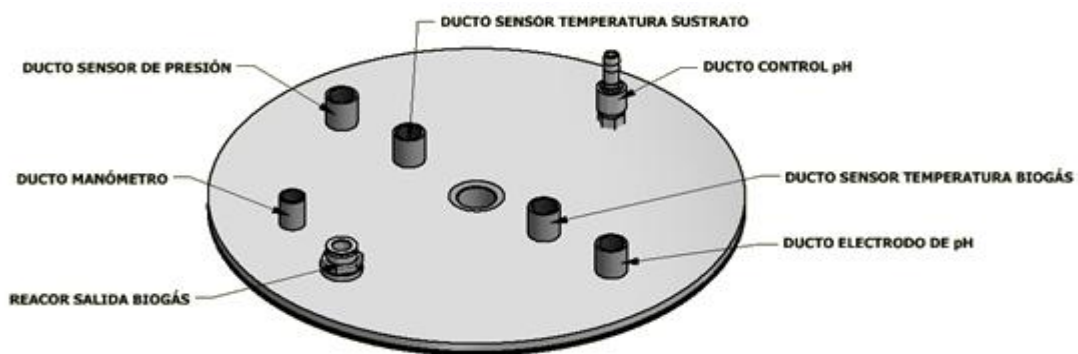


Figura 4.3 Tapa de la cámara de fermentación

4.1.1.3 Cámara de Agua o Sistema de Calentamiento del Sustrato

Para poder mantener una temperatura adecuada dentro de la cámara de fermentación se ha optado en implementar una camisa o cámara de agua en forma de anillo que rodea la cámara de fermentación, el cual estará proporcionada por 2 resistencias de inmersión, de esta forma se pretende mantener la temperatura deseada para el proceso de fermentación; aunque no hay información previa sobre este sistema de calentamiento empleado en digestores tipo batch, se ha optado por emplear una cámara de agua para cada digestor, esto con el fin de poder realizar ensayos de fermentación con controles de temperaturas totalmente independientes, esto supondrá un avance más óptimo y ahorro de tiempo en futuras investigaciones.



Figura 4.4 Cámara de Agua o Sistema de Calentamiento

Las dimensiones que poseerá nuestra cámara de agua no poseen una base sustentada de diseño más que el hecho de transmitir el calor por convección natural por consiguiente la cámara de agua poseerá una distancia de 7,5 cm radiales a partir del borde de la cámara de fermentación (Espacio suficiente para la implementación de las resistencias de inmersión, Tapones fusibles de seguridad y tapones para el ingreso de sensores de temperatura y agua). Posee un alto de 0.38m, la misma altura que posee la cámara de fermentación ya que la transferencia de calor tendrá una dinámica mayor en el eje radial, de esta forma se pretende tener una transferencia de calor lo más uniforme posible a lo largo del eje axial.

El sistema de calentamiento es desmontable capaz de cubrir el nivel máximo de sustrato que poseerá la CF. En la parte inferior consta de un anillo guía donde encaja la CF (Figura 4.4).

Las resistencias de Calentamiento tienen una rosca de 1.25 pulgadas, para las cuales se ha colocado una tuerca de 2 pulgadas en cada extremo, para tener una holgura en las medidas se ha dejado el cilindro externo en un diámetro de 0.45m.

Adicionalmente toda la parte externa de esta cámara contará con una capa aislante térmica con el fin de tener un sistema adiabático entre el medio externo y la cámara de agua.

Para determinar el espesor mínimo necesario del aislante determinamos primero el radio crítico de aislamiento (Cengel, 2007).

$$r_{crit} = \frac{K_{AISL}}{h_{aire}} \quad (4.1.5)$$

Dónde:

r_{crit} : Radio crítico del aislante

K_{AISL} : Constante de conductividad térmica por conducción del material aislante

h_{aire} : Constante de conductividad térmica por convección del aire ($0,036 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$)

El radio de aislamiento debe ser por lo tanto mayor que el radio crítico ($15 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$)

Reemplazando:

$$r_{crit} = \frac{K_{AISL}}{h_{aire}} = \frac{0,036}{15} = 0,0024m$$

Por consiguiente el espesor mínimo que debe tener nuestro aislante es de 2.4 mm

4.1.1.4 Agitador Mecánico

La implementación de un agitador en un digestor es de fundamental importancia debido a las siguientes razones:

- Se puede mezclar la biomasa fresca que se encuentra en la superficie con la biomasa ya fermentada en el interior
- Ayuda a mantener una densidad uniforme en la población microbacteriana
- Evita la formación de espacios muertos sin actividad
- Ayuda a soltar las burbujas de biogás presentes dentro de la mezcla para que suban a la superficie
- Ayuda a mantener una mejor degradación de la mezcla y por ende una mejor producción de biogás

Para la selección del tipo de agitador a utilizarse es importante tener en cuenta la densidad y viscosidad del fluido a agitarse (Universidad Central, s.f.).

Analizando que el digestor está orientado a procesar la mayor cantidad de mezclas que se puedan conseguir en el medio, y que estas mezclas no son en su

totalidad líquidas sino que poseen residuos sólidos en gran cantidad, la viscosidad de la mezcla es alta en comparación a la de la mayoría de fluidos, por consiguiente se tomara el agitador de tipo turbina.

Agitadores de Turbina

Son agitadores que se asemejan a los agitadores múltiples y cortas paletas, que giran con velocidades elevadas sobre un eje que va montado centralmente dentro del tanque. Las paletas pueden ser rectas o curvas, inclinadas o verticales. Los agitadores de turbina son eficaces para un amplio intervalo de viscosidades; en líquidos poco viscosos, producen corrientes intensas, que se extienden por todo el tanque y destruyen las masas de líquido estancado. Están compuestos por un componente impulsor con más de cuatro hojas montadas sobre un mismo elemento y fijadas a un eje rotatorio., en general son más pequeñas que las palas, midiendo entre el 30 y 50% del diámetro del tanque. (Universidad Central, n.d.)

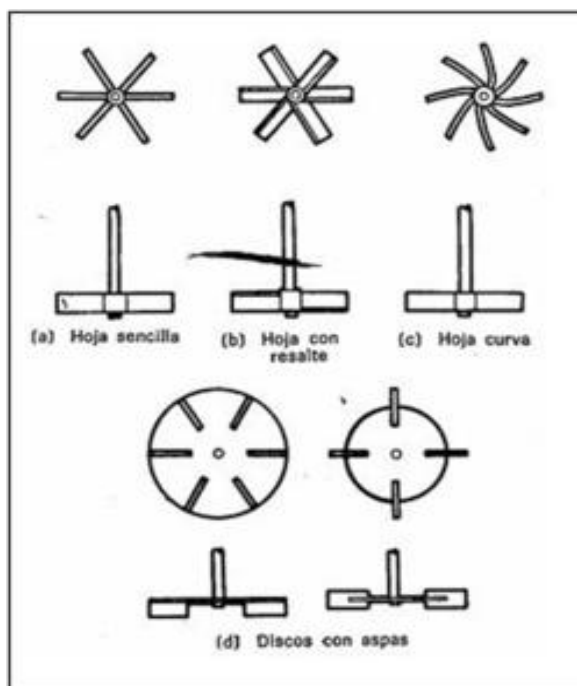


Figura 4.5 Agitadores tipo turbina

Por consiguiente se empleara un agitador tipo turbina con 4 aspas ya que este tipo de agitador puede operar en un rango muy amplio de viscosidades y su construcción es bastante sencilla.

En base al diámetro calculado de la CF se dimensionará el agitador siguiendo la tabla de proporciones básicas (Penaloza, s.f.):

Tabla 4.4

Proporciones básicas para diseño de agitador tipo turbina

Tabla de Proporciones		
$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{2} - \frac{3}{4}$	$\frac{C}{D_t} = \frac{1}{3}$	$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$
$\frac{D_d}{D_a} = \frac{2}{3}$	$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4} - \frac{1}{2}$	
$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$		

Dónde:

D_t : Diámetro del tanque o cámara.

D_a : Diámetro del agitador.

C : Distancia desde la base al fondo del tanque.

W : Altura de las aspas.

D_d : Diámetro del disco base del agitador

L : Longitud del aspa

J : Ancho del deflector o brecha

Para comprender de mejor manera a que partes del agitador corresponde cada medida se presenta las partes de un agitador turbina de tipo disco (Figura 6)

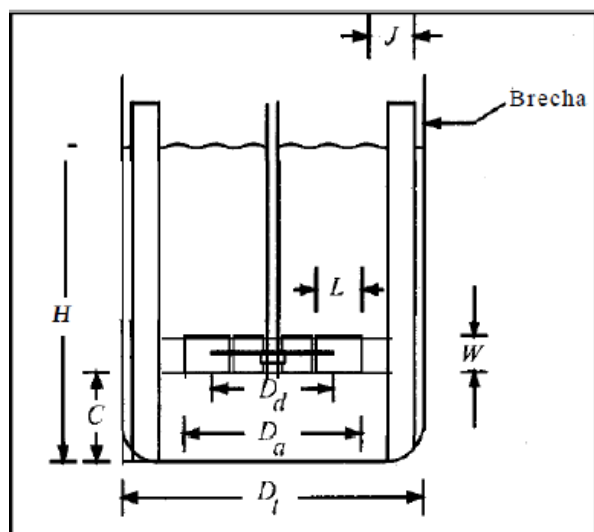


Figura 4.6 Agitador tipo disco con turbina

Realizando el cálculo respectivo con un diámetro de CF D_t igual a 0.30m, una relación entre el diámetro del agitador y diámetro de CF del 0.75 y una relación entre Longitud del aspa y diámetro del agitador de 0.5 se tiene (Tabla 4):

Tabla 4.5

Cálculos de las proporciones del agitador

<i>Parámetro</i>	<i>Medida (m)</i>
D_a	0,23
C	0,1
W	0,05
D_d	0,15
L	0,11
J	0,03

Se tiene entonces una longitud del aspa de 11 cm (factor 0.5 para agitadores de hoja sencilla) una distancia de la base al fondo del tanque de 10 cm, un ancho de la hoja de 5 cm y un ángulo de inclinación de 90°.

Como medida adicional se ha decidido colocar un juego de aspas cerca de la base del tanque a una distancia de 3 cm, esto con el fin de facilitar la salida de las burbujas de biogás que se generen en la parte inferior del tanque, y evitar las zonas

críticas donde se puedan generar espacios muertos sin actividad microbiana, el segundo juego de aspas estará situada a una distancia de 10 cm de altura de la base del primer juego (Figura 4.7).

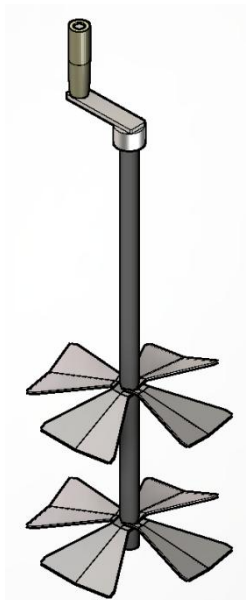


Figura 4.7 Agitador tipo turbina con 2 juegos de aspas

El agitador estará montado sobre dos bocines de giro, trabajados en acero inoxidable. Los bocines desmontables facilitarán la reparación del agitador cuando así lo requiera (Figura 4.8).

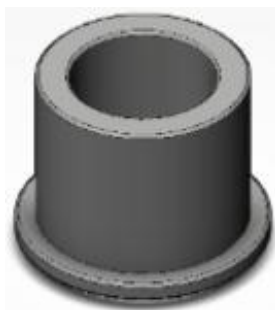


Figura 4.8 Bocín base para el agitador

4.1.2 Sistema de almacenamiento del biogás

Sistema encargado de almacenar el biogás generado durante el proceso de fermentación, está conformado por:

4.1.2.1 Gasómetro:

La producción de biogás en los digestores tipo Batch se puede estimar de acuerdo a la siguiente relación: $0.5 \sim 1.0 \text{ m}^3$ de biogás producido por cada m^3 del biodigestor. En cálculos anteriores se logró determinar que el volumen efectivo de nuestro biodigestor para los 5 Kg de materia, es de 0.027 m^3 . Por lo tanto para el tanque gasómetro se considerará aceptable un volumen entre 14 l y 20 l.

Para el gasómetro se utilizará bolsas de polietileno (Figura 4.9) por las siguientes razones:

- Las bolsas de polietileno, generalmente soportan presiones de trabajo de hasta 5 bares. Los sistemas de biogás típicamente alcanzan presiones de 2 a 3 bares, por lo tanto el polietileno es un material que resistirá.
- Estas bolsas son fáciles de conseguir, su costo es bajo respecto de otros materiales como puede ser acero o fibra de vidrio.
- El polietileno es un material inerte que no reacciona con los gases que componen el biogás, lo que lo hace una buena opción.
- Finalmente, una bolsa de polietileno, garantiza un almacenaje rápido y sencillo, además que ayuda su transporte a recintos o centros cromatográficos especializados para el estudio químico del biogás.

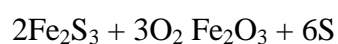


Figura 4.9 Gasómetro de polietileno

4.1.2.2 Filtro desulfurizador:

El sulfuro de Hidrógeno (H_2S) es uno de los componentes del biogás, el mismo que es tóxico para la salud humana, y corrosivo en sistemas mecánicos. Se lo distingue por el olor a huevo podrido. Para poder llevar la energía del biogás a otras necesidades de la producción y los servicios es necesario colocar un filtro desulfurizador.

El método más común de filtrado es la absorción del H_2S a partir de óxido de hierro. El método se apoya en la reacción química siguiente:



Para el dimensionamiento del filtro se tomó la producción máxima de biogás como $0.53 \text{ m}^3/\text{kg}$ (Ortega R., 2001) , que corresponde a las Hojas de patatas. Se tomó este valor por ser el mayor entre varios sustratos orgánicos puros.

Producción de gas máximo estimado		0.53	[m ³ /kg]
Volumen del digestor		5	[kg]
Total gas producido	$0.53 \times 5 =$	2.65	[m ³]
Densidad del H ₂ S		1.19	[kg/m ³]
		0.132	
Cantidad de H ₂ S en el gas (5%)	$2.65 \times 0.05 =$	5	[m ³]
Peso del H ₂ S en el gas producido	$0.1325 \times 1.19 =$	0.16	[kg]

Si aplicamos la regla de tres:

$$0.16 \leftrightarrow 56\%$$

$$X \leftrightarrow 100\%$$

Entonces, la cantidad de Fe_2O_3 teórico que se necesita es de 0.28 kg. En la práctica se incrementa en 20% esta cantidad, quedando como:

$$0.28 \times 1.2 = 0.34 \text{ kg de } \text{Fe}_2\text{O}_3$$

El filtro se construye con un recipiente relleno de virutas de acero previamente tratadas de la siguiente manera

Se lavan las virutas con detergente para eliminar la grasa y otras suciedades que puedan traer, y se dejan secar (Díaz P., 2012).

1. Se sumergen las virutas limpias en una solución de HCL a 5% durante 5-10 minutos, se extraen y se dejan secar al aire.
2. Se sumergen las virutas en una solución de NAOH a 5% durante 5-10 minutos y se dejan secar al aire.

4.1.3 Sistema de accesorios

Los accesorios mecánicos son implementos adicionales los cuales ayudan a los anteriores sistemas a tener un mayor rendimiento y facilidad para el proceso de fermentación anaeróbica entre los cuales tenemos:

4.1.3.1 Tapones fusibles:

Los tapones fusible o “termofusibles” son dispositivos sensibles al calor y sirven para para ventilar la presión de control a una temperatura predeterminada. Los tapones son fabricados mediante un proceso que asegura un funcionamiento libre de fugas.

Los termofusibles irán ubicados en la cámara de agua para darle mayor seguridad, los cuales pasarán a funcionar si la presión interna de la cámara de agua es demasiada alta. Estos dispositivos son de marca UMCO, fabricados en Colombia (Figura 4.10).



Figura 4.10 Tapón fusible marca UMCO

4.1.3.2 Racores para salida y entrada del biogás

Los racores son piezas metálicas con o sin roscas internar en sentido inverso, que sirven para unir tubos o mangueras y evitar la fuga de gases o líquidos

Para nuestro sistema se empleara dos racores con rosca de 1/2" y una salida para manguera de 12mm de diámetro, este tipo de mangueras facilitan el paso del biogás sin emplear grandes presiones (Figura 4.11).



Figura 4.11 Racor metálico con rosca de 1/2"

Los racores serán ubicados uno en la tapa de la CF y otro en el gasómetro

4.1.3.3 Conectores Prenso-Stop para conexiones eléctricas:

Como se ha explicado con anterioridad, el mantener un control de pH durante el proceso de fermentación anaeróbica es de vital importancia para asegurar la vida de las bacterias, como idea se ha empleado una válvula tipo "Presta o francesa" muy similar a las válvulas utilizadas para el llenado de aire en neumáticos, la peculiaridad

de este tipo de válvulas es no permiten la salida del biogás almacenado y permite la entrada de gases o líquidos mediante un adaptador o “clavija”.



Figura 4.12 Conectores herméticos para cables eléctricos

4.1.3.4 Ducto para el control de pH

Como se ha explicado con anterioridad, el mantener un control de pH durante el proceso de fermentación anaeróbica es de vital importancia para asegurar la vida de las bacterias, como idea se ha empleado una válvula tipo “Presta o francesa” muy similar a las válvulas utilizadas para el llenado de aire en neumáticos, la peculiaridad de este tipo de válvulas es no permiten la salida del biogás almacenado y permite la entrada de gases o líquidos mediante un adaptador o “clavija” (Figura 4.13).



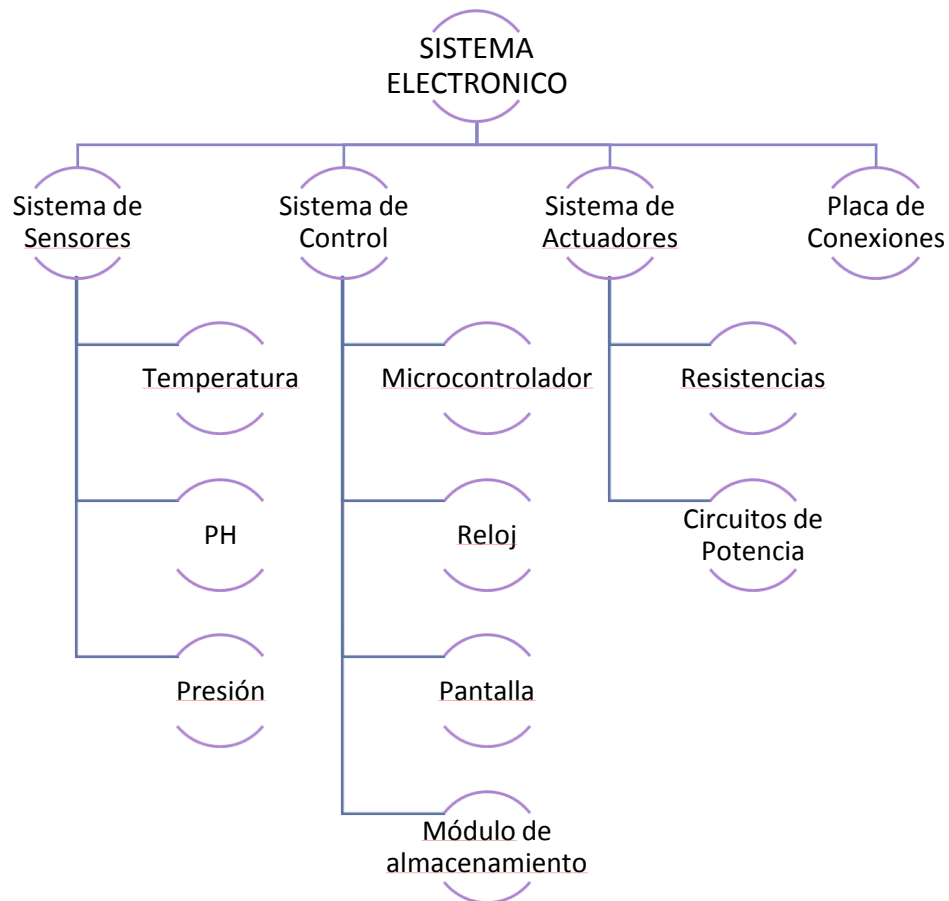
Figura 4.13 Válvula tipo presta

La válvula tipo presta será ubicada únicamente en la tapa de la CF, esto con el fin de poder realizar el ingreso de soluciones ácidas o alcalinas sin permitir una fuga de biogás.

4.2 Diseño electrónico

Cuadro 4.2

Esquema del sistema electrónico



4.2.1 Sistema de Sensores:

El sistema de sensores es el encargado de medir en todo momento las magnitudes físicas y químicas de las variables del sistema a lo largo del tiempo, con el fin transformarlas en variables eléctricas las cuales serán almacenarlas en una base de datos y empleadas en los algoritmos de control para el accionar de los actuadores.

El sistema de sensores está conformado por:

4.2.1.1 Sensor de Temperatura.

El sensor a emplear es el DS18B20, el cual es un termómetro digital de alta precisión, entre 9 y 12 bits de temperatura en grados Celsius (el usuario puede escoger la precisión deseada). Su temperatura operativa se encuentra entre -50 y 125 grados Celsius. La precisión, en el rango comprendido entre -10 y 85 grados es de ± 0.5 grados.

Su precio es económico, su interfaz de funcionamiento es sencilla y su uso es muy provechoso para proyectos que requieran mediciones precisas y confiables.

Se puede escoger entre el modelo sumergible y los modelos para uso en placas de circuitos (Aprendiendo a utilizar el sensor de temperatura DS18B20, s.f.).

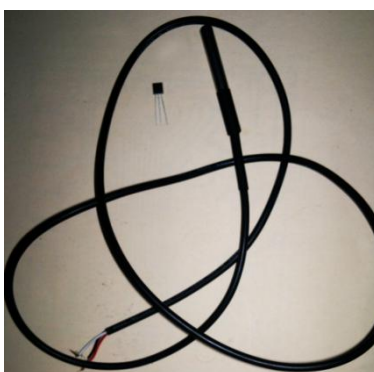


Figura 4.14 Sensor de temperatura DS18B20

A continuación las especificaciones técnicas del sensor:

Tabla 4.6

Especificaciones técnicas del sensor DS18B20

<i>ESPECIFICACIONES</i>	
<i>Señal de salida digital</i>	<i>9-12 bits °C</i>
<i>Rango de Temperatura</i>	<i>-50° to 125°C</i>
<i>Interfaz 1-Wire</i>	<i>Puede funcionar en 1 solo pin</i>
<i>Precisión (de -10°C a 85°C)</i>	<i>+/- 0.5 °C</i>
<i>Voltaje de alimentación (DC)</i>	<i>3.0 V a 5.5 V</i>

Para cada digester es necesario emplear 3 sensores de temperatura DS18B20 del tipo sumergible, 2 sensores estarán ubicados en la cámara de agua para el control de temperatura, y uno sumergido dentro de la cámara de fermentación CF.

Para su acondicionamiento, únicamente se requiere una resistencia pull-up de 4.7 k Ω conectada al pin de señal. Como es un sensor digital no se requieren elementos de filtrado. Los 8 sensores se encuentran conectados al mismo pin de señal.

4.2.1.2 Electrodo de pH

La determinación de pH consiste en medir el potencial que se desarrolla a través de una fina membrana de vidrio que separa dos soluciones con diferente concentración de protones. En consecuencia se conoce muy bien la sensibilidad y la selectividad de las membranas de vidrio delante el pH. Se utilizará un electrodo marca EXTECH:



Figura 4.15 Electrodo EXTECH

Para asegurar su correcto funcionamiento se deben tomar las siguientes precauciones:

- El electrodo debe mantenerse húmedo siempre para evitar daños al mismo.
- Se recomienda que se guarde en una solución de 4M KCl; o en un buffer de solución de pH 4 ó 7.

- No se debe guardar el electrodo en agua destilada, porque eso causaría que los iones resbalaran por el bulbo de vidrio y el electrodo se volvería inútil; se calibra mediante soluciones estandarizadas.

Tabla 4.7

Especificaciones técnicas del electrodo EXTECH

<i>ESPECIFICACIONES</i>	
<i>Rango de PH</i>	<i>0–12 pH</i>
<i>Rango de Temperatura</i>	<i>-5° to 80°C</i>
<i>Sistema de referencia</i>	<i>Ag/AgCl</i>
<i>Potencial Cero</i>	<i>7.0 pH</i>
<i>Conector</i>	<i>BNC</i>
<i>Longitud estándar</i>	<i>10 pies</i>
<i>Tensión de trabajo</i>	<i>+ - 414 mV</i>
<i>Tamaño</i>	<i>12 x 160 mm</i>

Circuito de acondicionamiento

Debido a que su voltaje de trabajo está en el rango de los milivoltios, se utilizará un circuito acondicionador fabricado por atlas Scientific, que transforma el valor recibido en potencial eléctrico, en un string que contiene el pH con 2 decimales y lo envía por puerto serial.

**Figura 4.16** Circuito de PH Atlas Scientific**4.2.1.3 Sensor de Presión**

El sensor de presión a utilizar es el MPX5700 (Figura 4.17), es un transductor piezo-resistivo con cubierta de silicio empleado para una amplia gama de

aplicaciones pero especialmente para el uso de microcontroladores y microprocesadores debido a que maneja una salida de carácter analógica, la cual es proporcional a la presión aplicada (Freescale Semiconductor, s.f.).

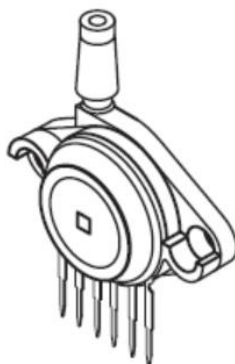


Figura 4.17 Sensor MPX5700

A continuación las especificaciones técnicas del sensor:

Tabla 4.8

Especificaciones técnicas del sensor MPX5700

<i>ESPECIFICACIONES</i>	
<i>Rango de presión</i>	<i>0 – 800kPa</i>
<i>Señal de salida</i>	<i>0-5V DC</i>
<i>Rango de temperatura de operación</i>	<i>-0 to 85 ° C</i>
<i>Voltaje de alimentación (DC)</i>	<i>5 V</i>

Circuito de Acondicionamiento

Se empleará un sensor MPX5700 en cada tanque. El acondicionamiento se lo realizará mediante un capacitor entre los pines de señal y tierra, para filtrar el posible ruido en la señal, adicional se colocará otro capacitor entre los pines de alimentación y tierra para tener una alimentación uniforme.

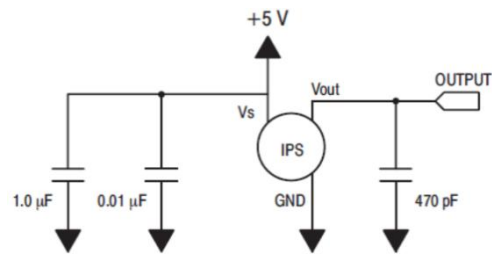


Figura 4.18 Capacitores de acondicionamiento para el sensor de presión

El sensor es de tipo análogo por lo que se utilizará un convertidor análogo/digital incorporado en el controlador, la conversión se la realiza mediante la siguiente función de transferencia:

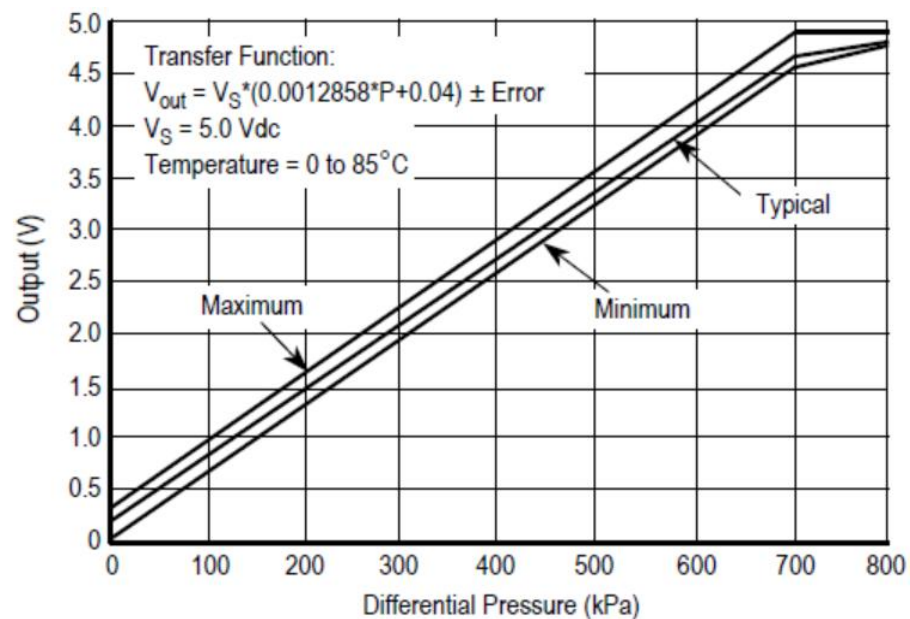


Figura 4.19 Función de transferencia Voltaje Vs Presión diferencial

4.2.2 Sistema de control

El sistema de control del digestor es el encargado de la recepción y almacenamiento de las variables que los sensores o transductores envían durante el proceso de fermentación anaeróbica así como también es el encargado de ejecutar los algoritmos de control para el funcionamiento de las resistencias eléctricas en el sistema de actuadores, El sistema de control está conformado por:

4.2.2.1 Microcontrolador:

Un microcontrolador es un circuito o conjunto de circuitos integrados programables que son capaces de ejecutar órdenes grabadas en su memoria, el microcontrolador seleccionado para nuestros digestores es una placa de prototipado rápida denominada ARDUINO MEGA 2560.

El Arduino es una plataforma de desarrollo de computación física de código abierto, basada en una placa con un sencillo microcontrolador y un entorno de desarrollo para crear software para placa. La programación del mismo se realiza mediante el lenguaje de programación propio de Arduino (Arduino programming language) basado en Wiring.

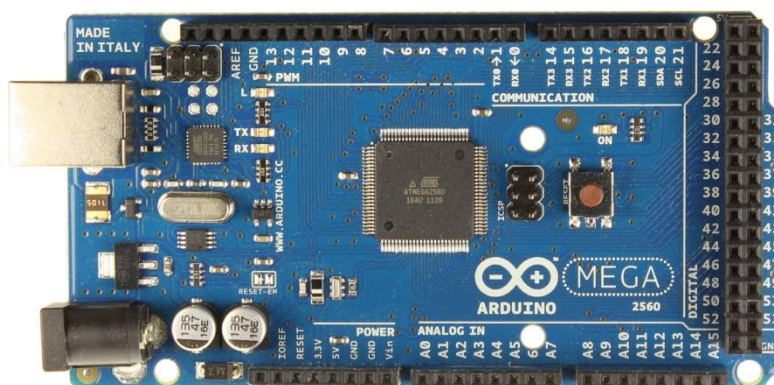


Figura 4.20 Arduino Mega 2560

4.2.2.2 Módulo de Reloj

Es un reloj en tiempo real con batería autónoma y memoria interna que almacena la hora configurada. Se utilizará para el almacenamiento y visualización de datos mediante comunicación I2C.

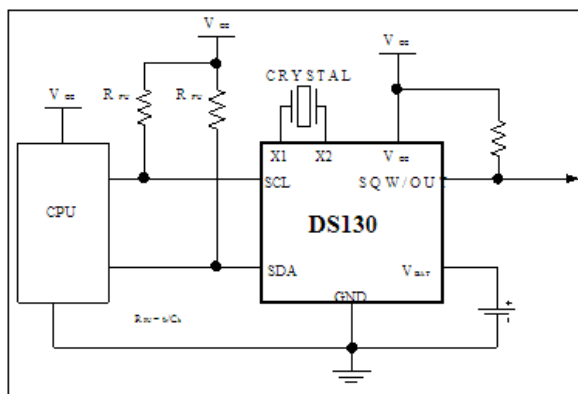


Figura 4.21 Esquemático módulo RTC DS1307

Fuente: (Maxim, 2008)

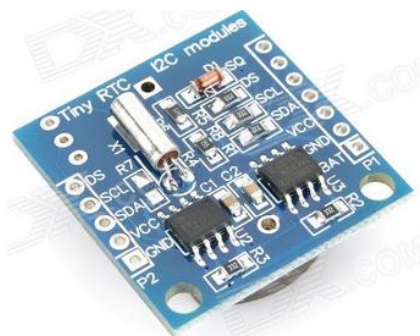


Figura 4.22 Módulo RTC DS1307

4.2.2.3 Pantalla

Para la visualización en tiempo real e ingreso de parámetros, el sistema contará con una pantalla TFT de 3.2 pulgadas con touch screen.



Figura 4.23 Pantalla TFT de 3.2 pulgadas

Tabla 4.9

Especificaciones técnicas de la pantalla

<i>ESPECIFICACIONES</i>	
<i>Tamaño</i>	<i>3,2"</i>
<i>Resolución</i>	<i>320x240 pixeles</i>
<i>Densidad de color</i>	<i>256 colores</i>
<i>Precisión del Panel Táctil</i>	<i>1 mm</i>
<i>Bus de datos</i>	<i>16 bits</i>
<i>Voltaje de alimentación</i>	<i>3,3 V d.c</i>

El módulo TFT trabaja con lógica de 3.3V mientras que el Arduino mega 2560 trabaja con lógica de 5V por lo que es necesario un módulo convertidor TFT shield.

**Figura 4.24** Módulo reductor de voltaje para la pantalla

4.2.2.4 Módulo de almacenamiento

El almacenamiento de los datos recogidos por la estación se lo realizará en un único archivo de texto denominado DATALOG.TXT, el cual se grabará en una tarjeta SD, a través de un módulo que utiliza comunicación SPI.



Figura 4.25 Módulo SD

La tarjeta SD (Secure Digital) es un formato de tarjeta de memoria no-volátil inventado por Panasonic hacia 1999. Son tarjetas de pequeña dimensión, que permiten el almacenaje de datos en todo tipo de dispositivos de hoy en día, como cámaras fotográficas, teléfonos móviles, PDA's, etc.

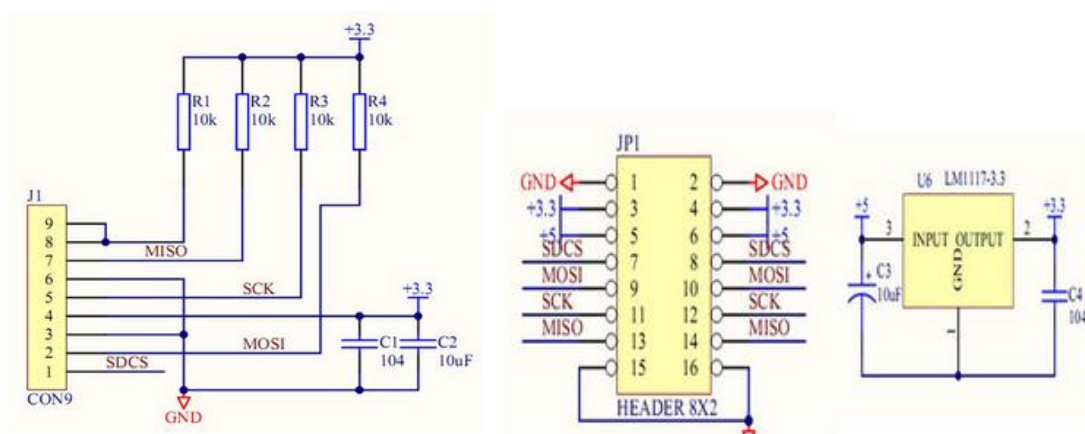


Figura 4.26 Esquemático módulo SD

Fuente: (Biotren, 2014)



Figura 4.27 Tarjeta SD

4.2.3 Sistema de Actuadores:

El sistema de actuadores es el encargado de transformar cualquier tipo de energía, en este caso la eléctrica, para generar un efecto sobre el proceso de automatización, el sistema actuadores está conformado por:

4.2.3.1 Resistencias:

El actuador principal del sistema son dos resistencias de inmersión de 1500W y voltaje de alimentación de 110V AC (Figura 16), colocadas a 180° en el digestor, mediante acople de tapón roscado. Las resistencias de inmersión están diseñadas para el calentamiento en contacto directo con el fluido: agua, aceite, materiales viscosos, disoluciones ácidas o básicas, etc.

El sistema de actuadores es el encargado de poner en funcionamiento las resistencias eléctricas del sistema digestor bajo un algoritmo de control ejecutado por el microcontrolador, el sistema de actuadores está conformado por:



Figura 4.28 Resistencia eléctrica de inmersión

- Dado que todo el calor se genera dentro del líquido, se alcanza un rendimiento energético máximo.
- Al no existir elementos distorsionadores, el control de la temperatura de proceso puede ser muy ajustado.
- Las resistencias de inmersión presentan varias opciones de acoplamiento al depósito o tanque donde se instalan: mediante tapón roscado, con racores, con brida, tipo sumergidores, etc.
- Se pueden utilizar resistencias para calentar cualquier tipo de fluido, desde agua hasta disoluciones corrosivas, aceites y fuel-oil muy viscosos, producción de vapor. También podemos utilizar resistencias de inmersión para trabajar en zonas clasificadas ATEX o en procesos industriales con una presión de trabajo por encima de 40 bares. (Electrifor, n.d.)

4.2.3.2 Circuitos de Potencia.

Los circuitos de potencia son la parte del sistema eléctrico que más consumo de corriente necesita, son considerados aquellos circuitos cuya corriente se encuentran en la orden de los amperios “[A]”, y son los encargados de excitar los relés, transistores de potencia etc., con el fin de poner en marcha los actuadores como resistencias eléctricas, motores, bombillas etc.

Las resistencias a utilizar son de *1500 W* con alimentación de *110 VAC*, en base a lo cual se dimensiona la corriente consumida.

$$I = \frac{V}{A} = \frac{1500 \text{ [W]}}{110 \text{ [V]}} = 13,63 \text{ [A]}$$

Como son dos resistencias, la corriente total en cada tanque será de *27 Amperios*, por lo que se activarán independientemente utilizando relés de estado sólido, SANYOUNG HSR-2D402Z.



Figura 4.29 Relé de estado sólido

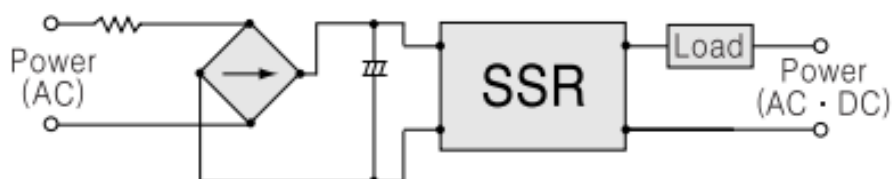


Figura 4.30 Diagrama de conexión

Tabla 4.10

Especificaciones técnicas del relé

ESPECIFICACIONES DE SALIDA	
Voltaje de carga	100 - 240 V AC
Voltaje pico	600 V
Corriente de Carga	40 A
Frecuencia	25 -65 Hz
Corriente de Fuga	15 mA
ESPECIFICACIONES DE ENTRADA	
Voltaje de operación	4 - 32 V d.c.
Impedancia	4 k Ω max.
Voltaje de Reset	1,5 V d.c.
Corriente de entrada	10mA (\pm 3)

Fuente: (HANYOUNG ELECTRONIC CO)

Circuito disparador

Para activar los relés de estado sólido, según la tabla de especificaciones técnicas se requiere de una entrada de 4 a 32 Vdc por lo que para esta aplicación utilizaremos una fuente de 12Vdc. Se permitirá el paso de esta señal a los sensores a través de un circuito con micro relés de 12V activados con una señal estándar de 5Vdc

4.2.4 Placa de Control

Para interconectar todos los elementos anteriormente detallados, se requiere de una placa que incluye lo siguiente:

- Zócalos para los elementos grandes (Arduino, SD Shield, TFT, Shield, Acondicionamiento para los sensores de PH, módulo RTC)
- Conectores especiales para cada sensor (PH, temperatura y presión)
- Circuito disparador para los relés de Potencia.
- Circuitos de acondicionamiento para los sensores de temperatura y presión.

Consideraciones de diseño:

- Debe existir la menor cantidad de cableado posible
- Todos los elementos de control se alimentarán desde el regulador incorporado en el Arduino MEGA 2560, el mismo que cuenta con un cargador de celular como su fuente independiente.
- El circuito disparador trabajará a 12V a partir de una fuente externa.

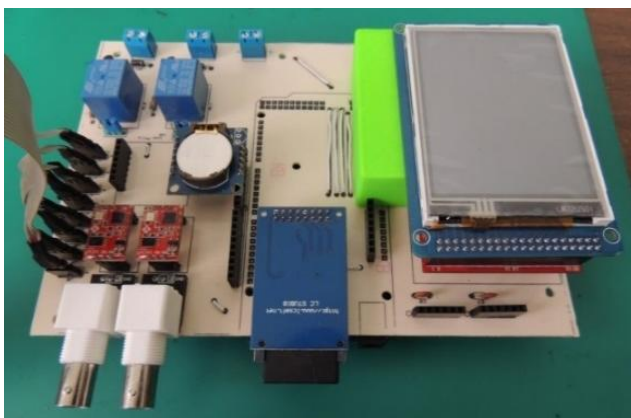


Figura 4.31 Placa de Control

Para el diseño tanto esquemático como físico de la placa de control se utiliza el software PROTEUS. El esquemático de la placa se puede encontrar en el anexo B.

Adicional se ha diseñado una caja de protección para el circuito de control, esta cumple la función de alojar el circuito para protegerlo del polvo, adicional mejora la estética del proyecto. Las piezas de esta caja se fabricarán en material PLA mediante el método de prototipado rápido (impresora 3D).

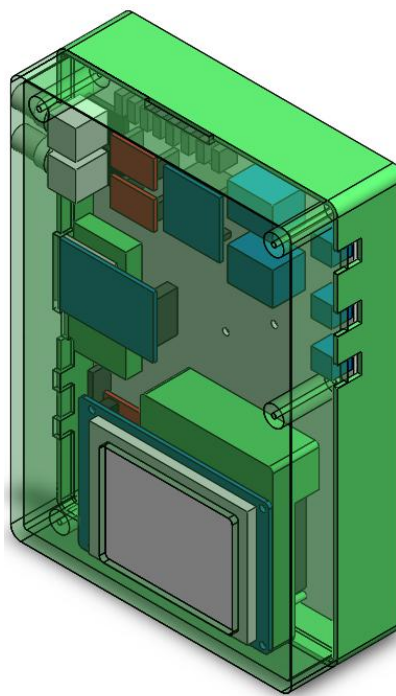
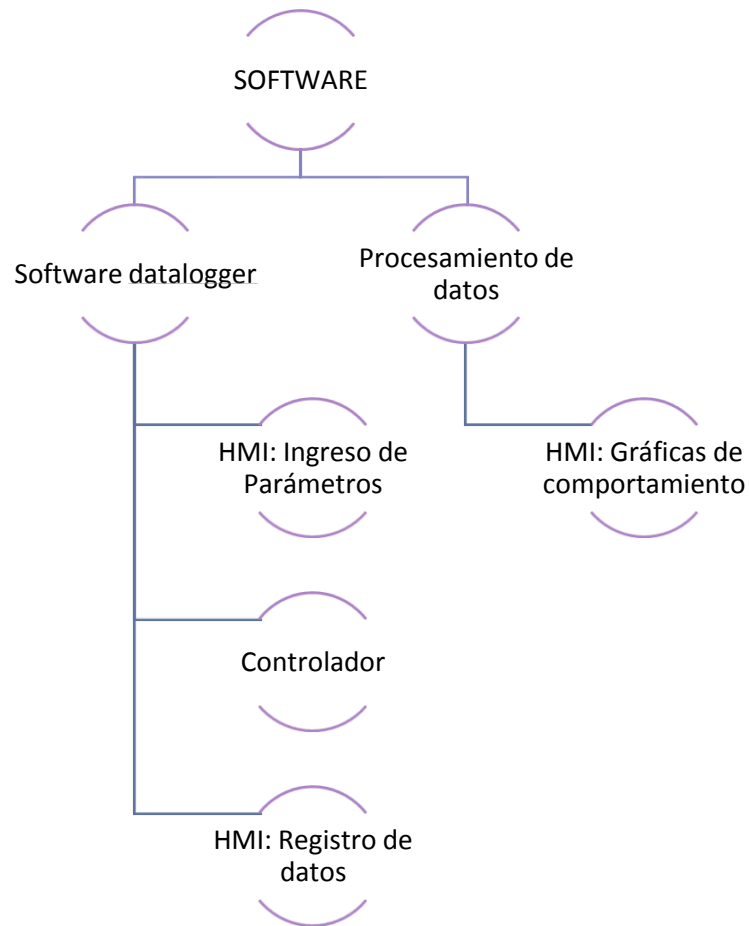


Figura 4.32 Modelo de la caja de control con sus elementos

4.3 Diseño de Software

Cuadro 4.3

Estructura del Software



El software de la microplanta consiste en dos programas independientes, el primero es un HMI para el equipo registrador de datos (datalogger), que incluye un método interactivo para el ingreso de parámetros, y el otro es una subrutina de MATLAB que permite graficar los datos del proceso para su interpretación.

4.3.1 Software Datalogger

El software para registro de datos se encuentra alojado en la memoria del Arduino Mega 2560, esta programado en lenguaje C, cuyo código se puede encontrar en el ANEXO D.

4.3.1.1 Ingreso de parámetros

La primera parte del programa permite ingresar la temperatura de los controladores para los tanques, esta rutina se ejecuta una sola vez cada que se enciende el equipo. En la pantalla inicial, se escoge entre iniciar un nuevo proceso y continuar el anterior. Para prevenir fallos por cortes de energía o reseteo involuntario. En caso de no seleccionar nada durante 20 segundos, se continuara automáticamente con el proceso anterior.

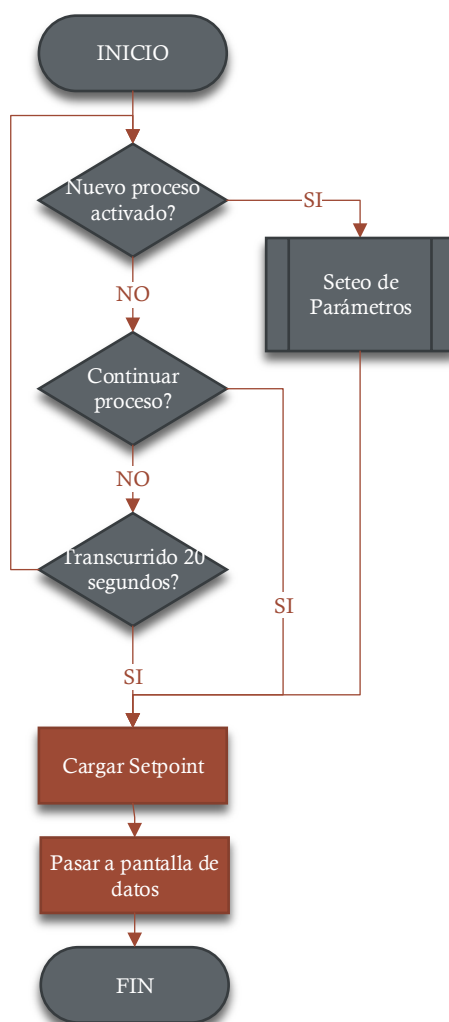


Figura 4.33 Algoritmo de la pantalla inicial

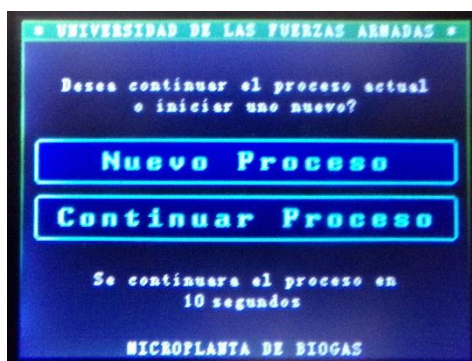


Figura 4.34 Pantalla inicial

Cuando se escoge un nuevo proceso, se pasa a las pantallas de selección de parámetros que permiten seleccionar si el controlador está activo o inactivo, y la temperatura a la que se desea hacer el control.

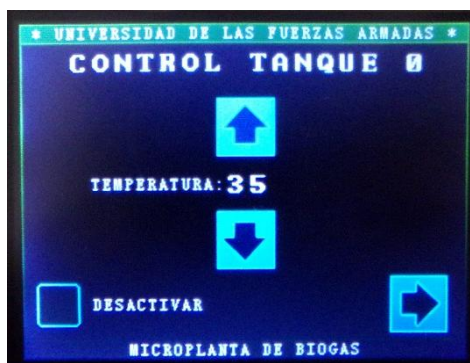


Figura 4.35 Pantalla de selección de parámetros

Una vez seleccionados los parámetros de cada tanque, se tendrá una pantalla de verificación.

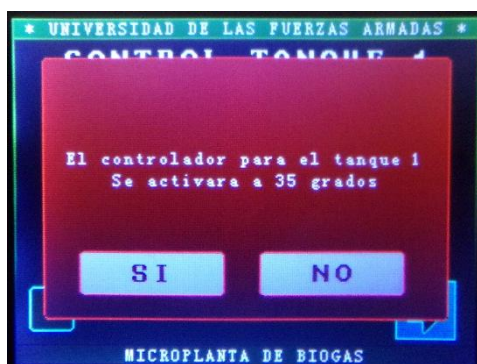


Figura 4.36 Pantalla de confirmación



Figura 4.37 Algoritmo de la pantalla de ingreso de parámetros

Las pantallas de selección de parámetros y de confirmación para ambos tanques son idénticas y se ejecutan una a continuación de otra. Si se acepta la última pantalla de verificación, el programa graba estos datos en la tarjeta SD e inicia el control.

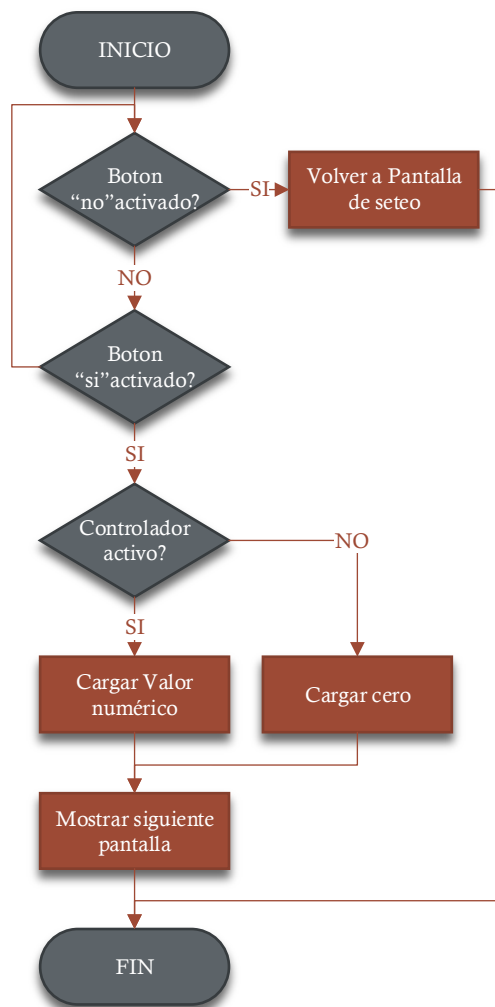


Figura 4.38 Algoritmo de la pantalla de confirmación

4.3.1.2 Controlador

El controlador es de tipo ON/OFF, ya que los sistemas de temperatura son lentos y no requieren de un controlador PID que es más caro y más difícil de implementar.

El algoritmo del controlador utiliza por seguridad, dos sensores de temperatura ubicados a 90 grados de las resistencias. En el controlador se debe cumplir que ambos sensores registran una temperatura menor a la deseada para encender los relés, y que ambos registran una temperatura mayor para apagar el mismo.

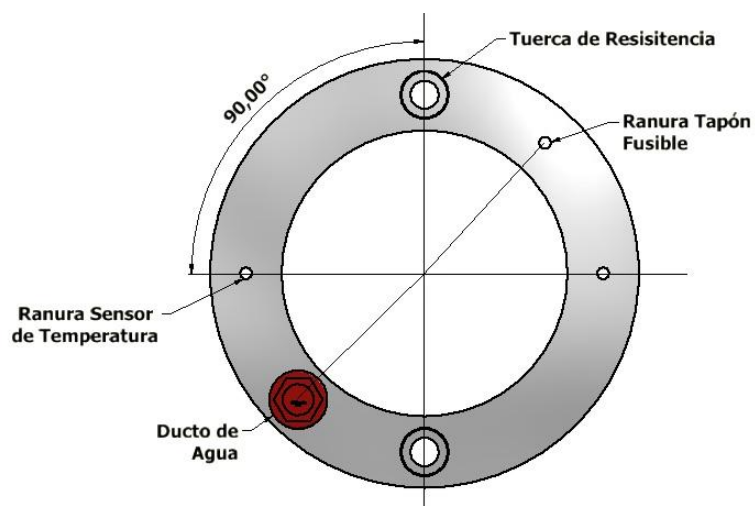


Figura 4.39 Ubicación de los sensores respecto de las resistencias

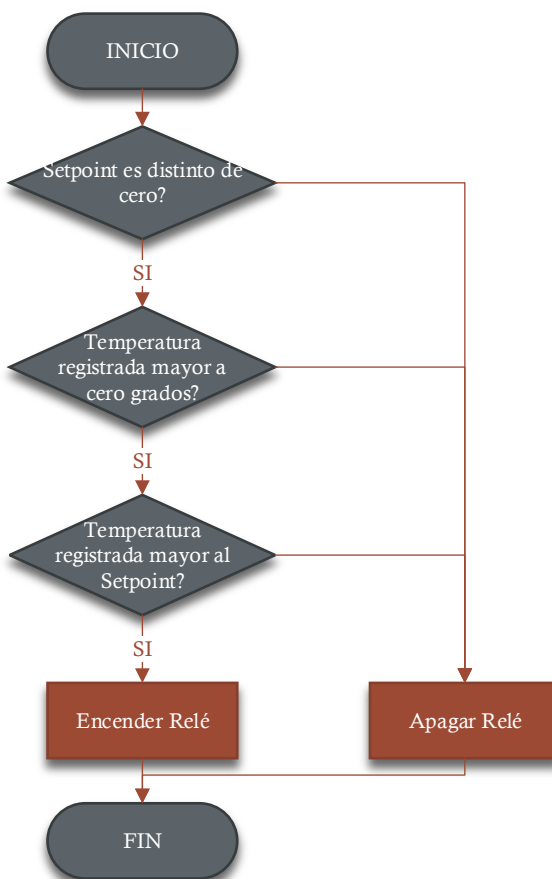


Figura 4.40 Algoritmo del controlador

Se toma en cuenta que cuando los sensores se encuentran desconectados, se registra una temperatura de -127.00, y cuando existe un error en el bus se registra 0.00 en todos los sensores. Por esta razón se ha decidido que cuando exista un fallo en alguno de los sensores, se apaguen los relés por seguridad.

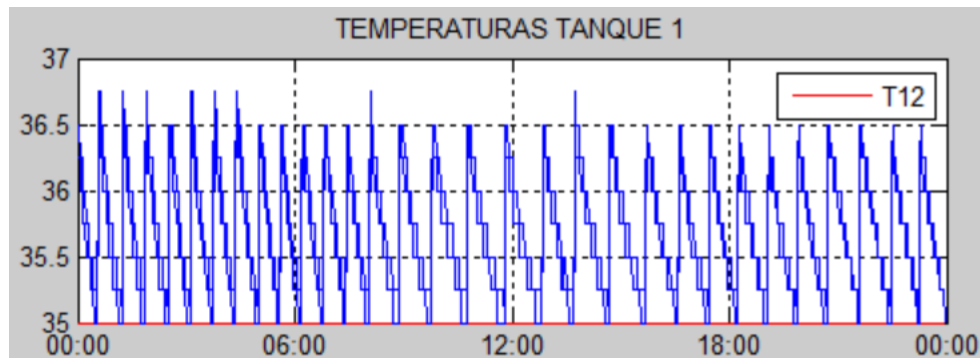


Figura 4.41 Muestreo de datos del controlador

4.3.1.3 Registro de Datos

El software de registro, es la principal instrucción del programa, y se ejecuta en loop mientras el equipo se encuentre encendido.

Su función es la de tomar los datos de los sensores cada minuto, ejecutar el controlador, almacenar los datos en memoria y mostrarlos en la pantalla única.

Los datos que registra visualmente para cada tanque son:

- T1*: temperatura del agua
- T2*: temperatura del agua
- T3*: temperatura del biogás
- T4*: temperatura del sustrato
- P*: presión del biogás
- PH*: ph del sustrato

Adicionalmente, se generara un archivo tipo texto, denominado “*DATALOG.TXT*” en donde se almacenara todas las variables del proceso de la siguiente manera:

PRIMERA LINEA: *MICROPLANTA DE BIOGAS*

SEGUNDA LINEA: *Fecha Hora C0 C1 S0 S1 T01 T02 T03 T04 T11 T12
T13 T14 A0 P0kpa P0psi A1 P1kpa P1psi PH0 PH1*

A partir de la tercera línea se almacenaran los datos, separados con espacios.

Tabla 4.11

Estructura del archivo de datos

<i>Nombre</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Ejemplo</i>
<i>Fecha</i>	<i>YYYY/MM/DD</i>	<i>2015/4/10</i>
<i>Hora</i>	<i>HH:MM</i>	<i>17:41</i>
<i>C0</i>	<i>Estado lógico del controlador del tanque 0</i>	<i>0</i>
<i>C1</i>	<i>Estado lógico del controlador del tanque 1</i>	<i>1</i>
<i>S0</i>	<i>Temperatura deseada para el tanque 0</i>	<i>20</i>
<i>S1</i>	<i>Temperatura deseada para el tanque 1</i>	<i>35</i>
<i>T01</i>	<i>Tanque 0, temperatura del agua</i>	<i>21.25</i>
<i>T02</i>	<i>Tanque 0, temperatura del agua</i>	<i>21</i>
<i>T03</i>	<i>Tanque 0, temperatura del biogás</i>	<i>25</i>
<i>T04</i>	<i>Tanque 0, temperatura del sustrato</i>	<i>20.5</i>
<i>T11</i>	<i>Tanque 1, temperatura del agua</i>	<i>23.75</i>
<i>T12</i>	<i>Tanque 1, temperatura del agua</i>	<i>30</i>
<i>T13</i>	<i>Tanque 1, temperatura del biogás</i>	<i>25.75</i>
<i>T14</i>	<i>Tanque 1, temperatura del sustrato</i>	<i>20.5</i>
<i>A0</i>	<i>Tanque 0, presión del biogás en bytes</i>	<i>39</i>
<i>P0kpa</i>	<i>Tanque 0, presión del biogás en kPa</i>	<i>-1.46</i>
<i>P0psi</i>	<i>Tanque 0, presión del biogás en psi</i>	<i>-0.24</i>
<i>A1</i>	<i>Tanque 1, presión del biogás en bytes</i>	<i>40</i>
<i>P1kpa</i>	<i>Tanque 1, presión del biogás en kPa</i>	<i>-0.7</i>
<i>P1psi</i>	<i>Tanque 1, presión del biogás en psi</i>	<i>-0.12</i>
<i>PH0</i>	<i>Tanque 0, PH del sustrato</i>	<i>6.51</i>
<i>PH1</i>	<i>Tanque 1, PH del sustrato</i>	<i>6.7</i>

Todas las temperaturas en grados centígrados



Figura 4.42 Pantalla de registro de datos



Figura 4.43 Algoritmo del registro de datos

4.3.2 Procesamiento de datos

El software de procesamiento consiste de una rutina de Matlab que transforma el archivo de texto, en un objeto *fints* (*financial time series*) de Matlab, el cual permite graficar los datos obtenidos en función del tiempo, y realizar ciertos análisis estadísticos.

La primera pantalla del programa en Matlab es un cuadro de diálogo que nos permite seleccionar el archivo que queremos analizar. Este cuadro admite archivos de tipo texto. Pero deben cumplir con el formato especificado en el punto 4.3.1.3.

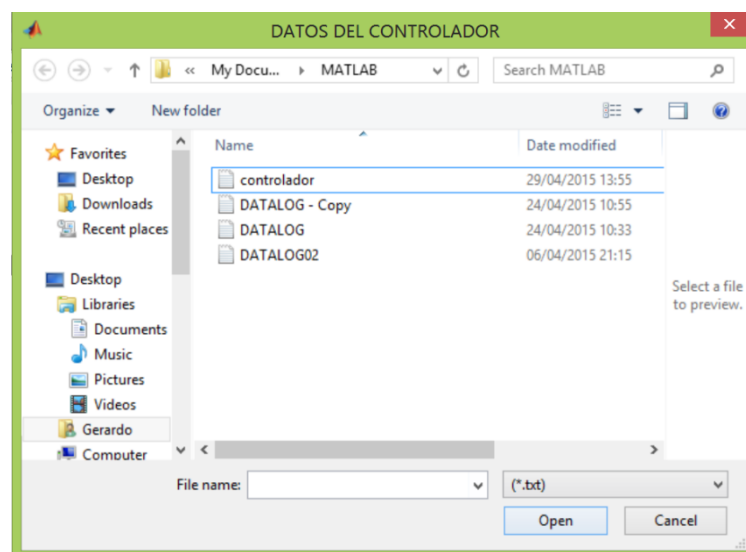


Figura 4.44 Cuadro de diálogo para abrir el archivo de datos

Si el usuario selecciona “Cancelar” se desplegará un mensaje de error.

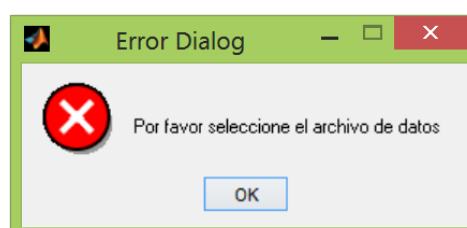


Figura 4.45 Ventana de error

A partir de este momento el programa almacenará los datos, y se generarán varias pantallas de gráficos, donde se puede observar las variables del proceso en función del tiempo transcurrido durante el experimento.

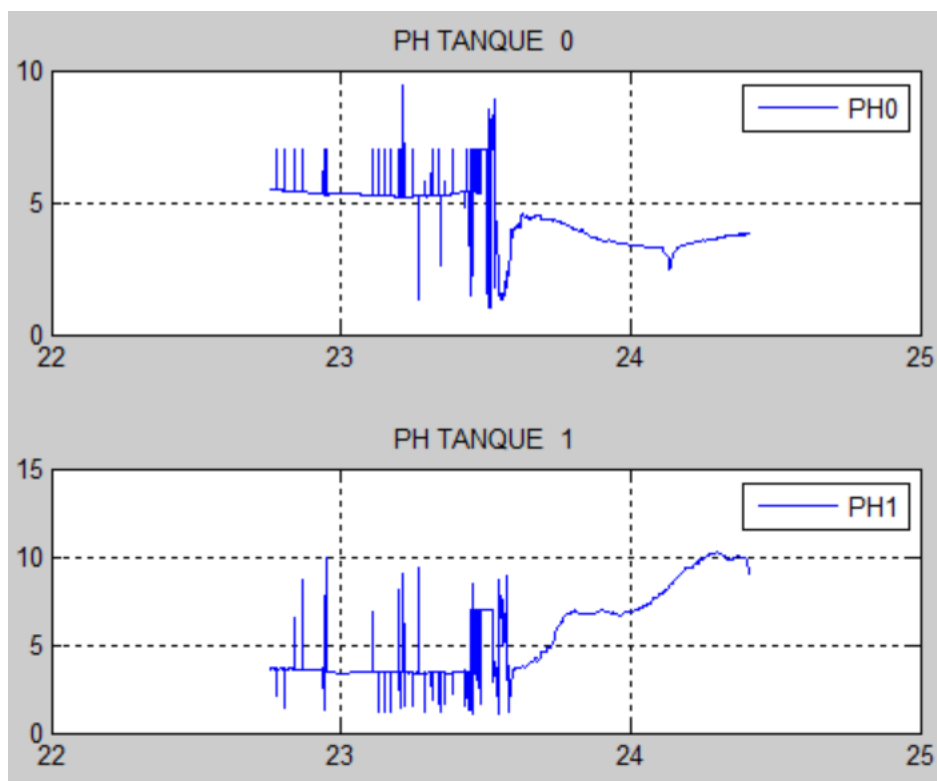


Figura 4.46 Ejemplo de gráfica de PH en ambos tanques.

CAPITULO 5

CONSTRUCCION Y MONTAJE

La parte de construcción y montaje de la microplanta se la realizó siguiendo las especificaciones mencionadas en el capítulo 4

5.1 Construcción del Sistema Mecánico

Los tanques fueron elaborados en la empresa denominada INDUSTRIA FERROMEDICA CIA. LIMITADA Ubicada en Los aceitunos E1-116 y Av. Galo Plaza Lasso Quito-Ecuador

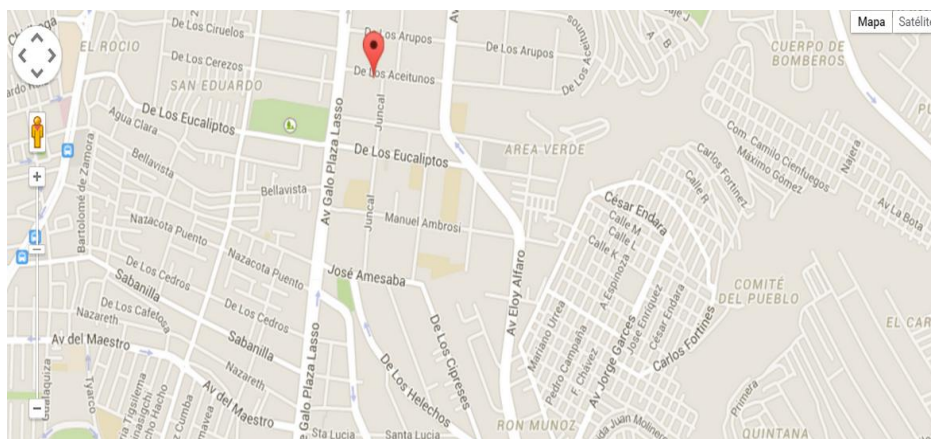


Figura 5.1 Localización de la empresa

5.1.1 Construcción de los Digestores

Para la construcción fue indispensable la elaboración de planos que contemplen las medidas y requerimientos establecidos con anterioridad, elaborados mediante un programa de diseño de elementos en 3D asistido por computador como es Autodesk Inventor, el cual es capaz de generar los planos necesarios para la construcción de los digestores (Véase en Anexos)

Adicional a esto se procedió a la selección del material con el cual se construyó los digestores, para esto se procedió se analizó las ventajas y desventajas de los 3 tipos de materiales más empleados en este tipo de proyectos: PVC, acero inoxidable y vidrio, los cuales fueron analizados bajo los siguientes parámetros: Facilidad de construcción, durabilidad, facilidad en la transferencia de calor y costo

Para el criterio de facilidad de construcción, se constató que tanto el material PVC y el vidrio presentan restricciones que se ajusten a la geometría de los digestores, debido que son necesario el uso de moldes con el fin de fundir dichos materiales y conseguir los digestores, adicional a esto se presentaron dificultades en encontrar moldes que se ajusten a las dimensiones establecidas, sin embargo dichas limitaciones no las presenta el acero inoxidable, ya que este material posee una mayor versatilidad en los procesos de manufactura, debido a que partiendo de la lámina esta puede ser sometida a procesos de corte, dobléz y soldadura para conseguir la forma y dimensiones de los digestores

Con respecto a la durabilidad, ninguno de los materiales presenta diferencias significativas en lo que se refiere al proceso de biodegradación, ya que son materiales que han sido utilizados en este tipo de proyectos y soportan perfectamente las exigencias del trabajo, por consiguiente este criterio no fue determinante al

momento de seleccionar el material, sin embargo se resalta que entre los aceros, el acero inoxidable es más resistente a la humedad y oxidación, y no es necesario emplear un proceso de cromado como protección adicional.

Lo referente a la transferencia de calor, el acero inoxidable indudablemente posee mejores características en comparación a los otros dos materiales, lo que lo hace perfecto para nuestro sistema de calentamiento planteado, ya que el PVC y el vidrio son considerados como materiales aislantes.

En cuanto a costos, es cierto que el PVC y el vidrio son más baratos con respecto al acero inoxidable, sin embargo considerando el costo de fabricación, el precio de dichos materiales se eleva de igual forma o hasta superior con respecto al precio del acero inoxidable, debido a que el proceso de fabricación demanda el uso de moldes los cuales tienen que ser fabricados, y para un solo prototipo no es viable.

En base a lo planteado anteriormente; el material seleccionado para la construcción de nuestros digestores es el acero inoxidable, por lo que se empleó una plancha de 3 mm para el cuerpo del digestor y la cámara de agua; y una plancha de 6mm de espesor destinada para el anillo y tapa de la cámara de fermentación ya que esta área es susceptible a deformaciones por la presión interna generada por el biogás.

5.1.2 Agitador Mecánico

Del mismo modo que el cuerpo del tanque, el agitador mecánico fue elaborado a base de acero inoxidable, siguiendo las especificaciones indicadas en el capítulo 4, el diámetro del eje es de 7/8 de pulgada (22 mm) con un largo de 60 cm, para el movimiento manual de nuestro agitador fue necesario la creación de una palanca que

permita el movimiento manual del agitador, esto con el fin de mezclar de forma ocasional el sustrato durante el proceso.

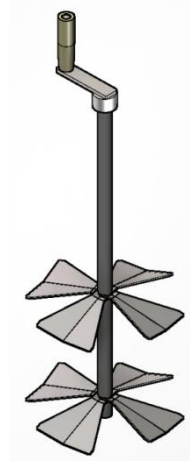


Figura 5.2 Agitador mecánico

5.1.3 Acoples mecánicos

La creación de acoples mecánicos fue fundamental para la parte de montaje de los digestores, ya que estos permitieron una fácil conexión y montaje de los sensores, actuadores y racores.

5.1.3.1 Acoples Roscados.

La conexión de racores, prensaestopas y resistencias se las hizo a través de acoples roscados ya que dichos implementos poseen una rosca externa, y debido a la complejidad de soldar estos implementos de forma directa a los tanques, se optó por la creación de acoples con rosca interna para cada uno de ellos, esto con el fin de ayudar en el montaje y desmontaje del equipo así como proveer la facilidad de limpieza del mismo.



Figura 5.3 Acoples roscados

En el mercado es posible conseguirse este tipo de implementos, sin embargo las prensaestopas poseen una rosca externa milimétrica, cuya medida no es posible encontrarla en el mercado, por consiguiente para este tipo de accesorios fue necesario la construcción de dichos implementos, el material para los acoples mecánicos sigue siendo el mismo, acero inoxidable (Véase figura 5.3).

A continuación mostramos la tabla de implementos para los cuales fue necesario emplear acoples con rosca interna.

Tabla 5.1

Accesorios de la tapa con las medidas de sus roscas externas.

<i>Accesorio</i>	<i>Numero de Acoples</i>	<i>Medida de la Rosca</i>
<i>Prensaestopas</i>	6	15 mm
<i>Racor Manómetro y Sensor de Presión</i>	4	1/4 in
<i>Racor Ducto Salida de Gas</i>	2	1/2 in
<i>Enchufe Hembra control de pH</i>	2	1/8 in
<i>Resistencias de inmersión</i>	4	32 mm
<i>Ducto entrada y salida de agua</i>	4	1/2 in

5.1.3.2 Bocín para el Agitador

Con respecto a los implementos necesarios para el montaje del agitador mecánico fue indispensable la creación de bocines uno ubicado en el centro de la tapa de digestor y otro ubicado en el fondo de la cámara de fermentación, lo bocines

además de hacer de guía, facilitar el montaje y desmontaje de nuestro agitador con el fin de facilitar la limpieza de los tanques (Véase figura 5.4), hacen de base en la que se ubica un retenedor hidráulico el cual impide la fuga de biogás cuando el agitador se encuentra en movimiento.



Figura 5.4 Bocín para el agitador

5.1.3.3 Pernos de presión

Con respecto a la sujeción de las tapas de los digestores fue necesario el uso de 16 pernos M10, esto con el fin de garantizar una sujeción y hermeticidad adecuada, la recomendación en diseño de tapas empernadas sometidas a una presión interna menor de 5 bares para gases, indica que la distancia de perno a perno no debe superar una distancia de 5 veces el diámetro del perno. (Véase figura 5.5).



Figura 5.5 Tapa con sus accesorios

5.2 Construcción del Sistema Electrónico

El sistema eléctrico o alimentación se conforma de dos partes, una designada a la parte de potencia o actuadores y otra designada al circuito de control

5.2.1 Circuito de Potencia.

El Circuito de Potencia está encargado de alimentar o energizar a los actuadores por medio de las señales eléctricas u órdenes que son emitidas por el circuito de Control, adicional a esto cabe resaltar que es la parte que más consumo de corriente emplea debido a que tiene que energizar a los relés de potencia para después excitar o encender a las resistencias de inmersión.

Debido a que esta parte del sistema eléctrico emplea más intensidad de corriente es necesario realizar los cálculos respectivos para determinar el cableado adecuado que soportará sin ningún problema la intensidad de corriente requerida para el accionamiento de los actuadores.

Cálculos:

4 Resistencias de inmersión

$P = 1500$ Watts

$V = 110$ Vol. AC

$$P = V * I \quad (5.2.1)$$

Dónde:

$P =$ Potencia del actuador [W].

$V =$ Tensión de alimentación [V].

$I =$ Intensidad de corriente [A].

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1500}{110} = 13.64 = 14 \text{ Amp.}$$

La intensidad de corriente empleada por cada resistencia será de 14 amperios.

Una vez conocida la intensidad de corriente requerida el siguiente paso es ir a la tabla para conductores eléctricos empleada por los fabricantes (Cuytronic).

Tabla 5.2

Tipos de Conductores Eléctricos

<i>Calibre AWG-MCM</i>	<i>Sección real [mm²]</i>	<i>Corriente Admisible [A]</i>
14	2,081	30
12	3,309	40
10	5,261	55
8	8,366	70
6	13,3	100
4	21,15	130
3	26,67	150
2	33,63	175
1	42,41	205
1/0	53,48	235
2/0	67,43	275
3/0	85,03	320
4/0	107,2	370
250 MCM	126,7	410
300 MCM	151	460

Tal como indica la tabla 5.2, el cable adecuado para nuestra etapa de potencia sería un cable del número 14 o 16, sin embargo cabe recordar que son 4 resistencias de inmersión (2 para cada tanque) por consiguiente la forma de conexión de las mismas puede afectar en la intensidad de corriente requerida.

El primer escenario sería conectar cada resistencia en paralelo, de esta forma se emplearía una alimentación de 110 Vol. para todas las resistencias, pero las corrientes se sumarían siguiendo el principio de las Leyes de Kirchhoff teniendo una intensidad de corriente de 56 amperios como corriente máxima, lo cual correspondería a un cableado del número (10 – 8), sin embargo en las instalaciones eléctricas de los laboratorios, el cableado eléctrico interno de la Red de 110 Vol. es

del número 14 por consiguiente emplear dicha tensión traería serios problemas de calentamiento de los cables, los cuales podrían terminar en un incendio

Por consiguiente se empleó una conexión de resistencias en serie (Véase figura 5.6), la cual mantendrá la misma intensidad de corriente para ambas resistencias ubicadas en cada tanque, sin embargo al realizar una conexión en serie es necesario emplear una tensión equivalente a la suma de todos los actuadores conectados en serie, por tal motivo al tensión de alimentación para este caso fue de 220 Vol., la cual se distribuyó sin ningún problema para cada resistencia.

Las instalaciones eléctricas de los laboratorios del DECEM cuentan con tomas de 220 vol. por consiguiente fue posible realizar la conexión planteada anteriormente, con respecto a la intensidad de corriente máxima requerida bastó con duplicar la corriente en cada línea de las resistencias, por consiguiente la intensidad de corriente máxima es de 28 amperios, siguiendo la tabla 5.2 el cable requerido para nuestra conexión es un cable del número 14.

A continuación se muestra la conexión empleada:

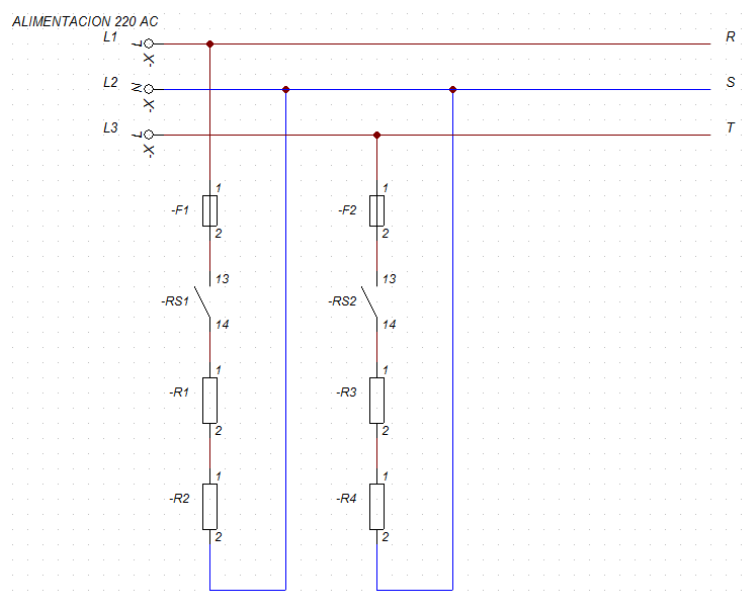


Figura 5.6 Circuito de conexión Etapa de Potencia.

Dónde:

F1, F2: Fusibles de protección, limitador de corriente tipo D, tamaño 25 A.

RS1, RS2: Relés de Estado Sólido

R1, R2, R3, R4: Resistencias de Inmersión

Para el accionamiento de las Relés de estado sólido se emplearon dos relés electromecánicos de uso común, los cuales se encuentran conectados a la placa de control, dichos relés electromagnéticos al excitarse, cambian su estado, cerrando el circuito de alimentación de los relés de estado sólido.

Para accionar los relés de estado sólido es necesario emplear una fuente de alimentación de 12 voltios DC, la cual sale de un transformador pequeño, a continuación se muestra el diagrama de conexión:

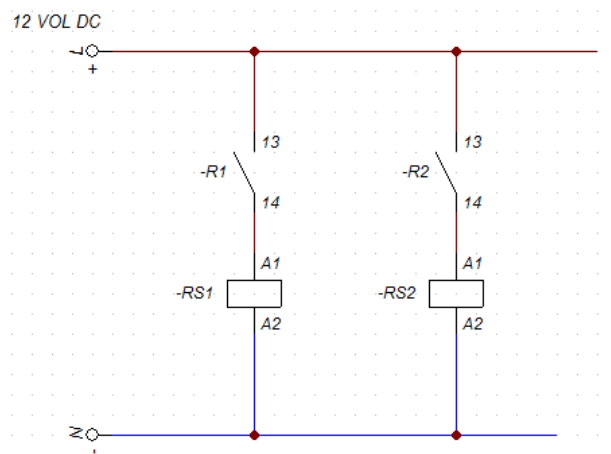


Figura 5.7 Circuito de alimentación Relés de estado solido.

Dónde:

R1, R2: Contactos de relés electromagnéticos.

RS1, RS2: Bobina de excitación del Relé de estado sólido.

Debido a que esta parte usa una fuente de salida de 12 Vol. A 1.5 amperios en corriente, el cableado para esta conexión es del conductor número 16.

5.2.2 Circuito de Control

El circuito de control es la parte más delicada de nuestra planta debido a que es el encargado de alimentar el controlador Arduino, módulo de almacenamiento de datos SD, módulo de visualización de datos LCD, módulo de sensores pH, circuitos de acondicionamientos de sensores de temperatura y presión, alimentación de sensores, relés electromagnéticos para accionamiento de relés de estado sólido etc., por lo cual la corriente que manejan dichos implementos de gama baja es menor a 0.5 amperios, adicional que la alimentación de estos dispositivos es de 5 Vol. DC.

Por tal motivo el circuito de control debe conectarse en un circuito diferente al de potencia por seguridad. A continuación mostramos el diagrama de conexión de nuestro circuito de control.

Como se puede observar en la figura 5.8, se utilizaron fuentes transformadoras de 110 vol. AC a tensiones de 5 vol. DC y 12 vol. DC respectivamente, estas fuentes se las adquirió en el mercado, las fuentes poseen sus respectivos fusibles de protección a la corriente por lo que no hubo necesidad de dimensionar dichas protecciones, los conductores eléctricos empleados en este circuito, para alimentar la placa de control son del número 16, A pesar de que se pudo emplear cable más delgado, el número 16 es el cable más delgado permisible cuando se posee alimentación de 110 vol. AC.

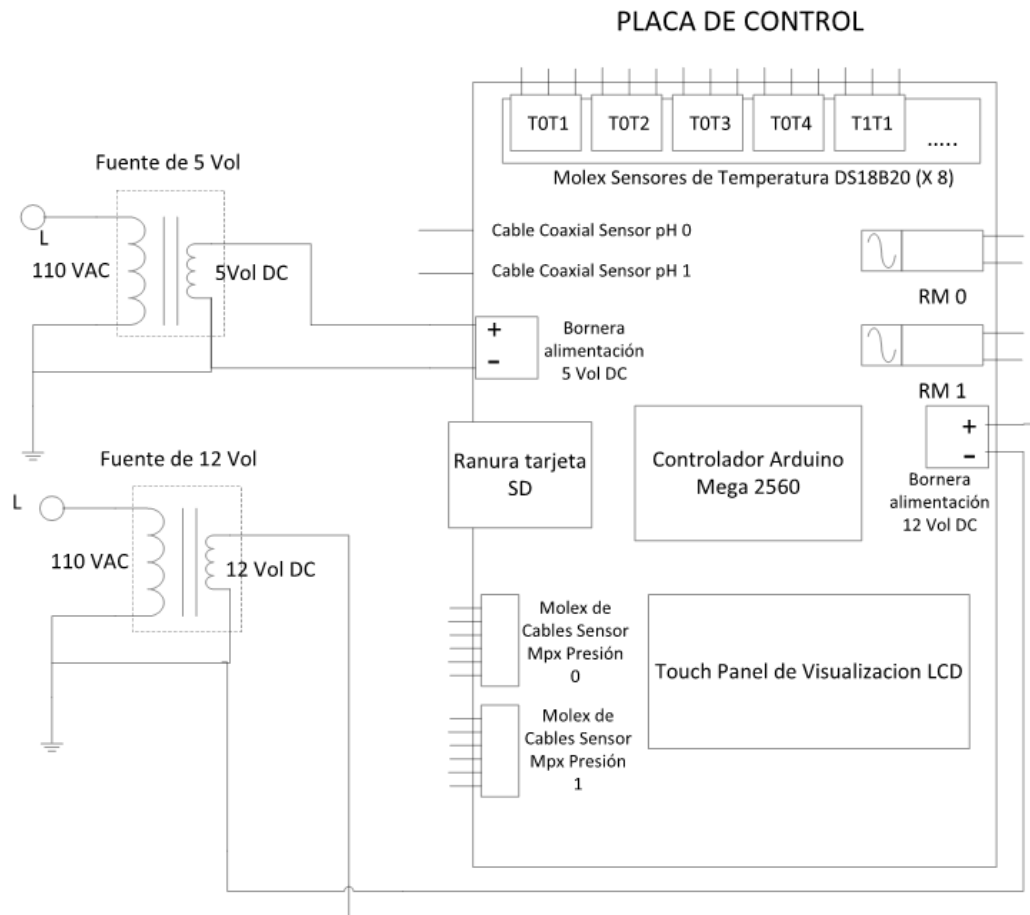


Figura 5.8 Diagrama Circuito de Control

5.3 Montaje del Equipo

Una vez establecido las dimensiones específicas de los tanques y los diagramas eléctricos de control y potencia, pasamos al montaje de los digestores, para esto fue necesario construir una estructura base como soporte con el fin de tener la facilidad de desfogar el agua a través de una válvula on/off ubicada en la parte inferior del tanque (Véase en figuras 5.9 y 5.10).

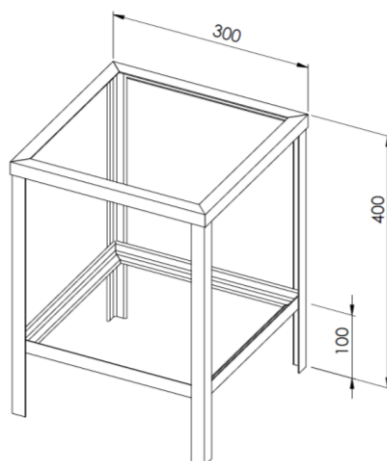


Figura 5.9 Dimensión de la estructura base (mm)



Figura 5.10 Válvula on/off en la base del tanque

Como se mencionó anteriormente la construcción de los tanques fue netamente elaborada en la empresa FERROMEDICA bajo las especificaciones de los planos elaborados previamente, los digestores quedaron de la siguiente forma (Véase Figura 5.11):



Figura 5.11 Tanque Digestor

En la parte superior del tanque podemos ver el indicador de presión o manómetro, el eje de nuestro agitador, los racores para salida del biogás, y los acoples para las prensaestopas por dónde van los sensores de temperatura presión y pH hacia la Cámara de Fermentación (Véase Figura 5.12):



Figura 5.12 Tapa del Digestor

Como aislante térmico se empleó una capa de 150cm de largo, 45cm de ancho con un espesor de 3 mm esto con el fin de evitar en lo posible que el calor ingrese en los días soleados y se escape el calor interno por las noches.

Para determinar el espesor necesario del aislante determinamos primero el radio crítico de aislamiento:

$$r_{crit} = \frac{K_{AISL}}{h_{aire}} = \frac{0,036}{15} = 0,0024m \quad (5.3.1)$$

Dónde:

$$K_{AISL} = 0,036 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \quad \text{Tabla A-6 Transferencia de calor Cengel (Espuma).}$$

$$h_{aire} = \frac{5+25}{2} = 15 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \quad \text{Constante de TC para la convección del aire.}$$

El espesor del aislante térmico debe ser por lo tanto mayor que el radio crítico.

$$e_{AISL} = 0,03m \quad \text{Espesor del aislante térmico}$$



Figura 5.13 Capa de aislante térmico

Con respecto al montaje del circuito de control fue indispensable hacer uso de una caja de protección eléctrica de 40x25 cm la cual albergara al circuito de control, los relés de estado sólido y las fuentes de 12 y 5 vol. (Véase Figura 5.14)

Como se aprecia en la figura 5.14, para proteger la pantalla LCD y la placa de control (Véase Figura 5.15) se implementó una caja adicional hecha de Polímero PLA hecha en impresoras 3D, esto evita que la humedad, suciedad o cualquier agente externo tenga contacto directo con la placa de control. (Véase Figura 5.16)



Figura 5.74 Caja de protección eléctrica

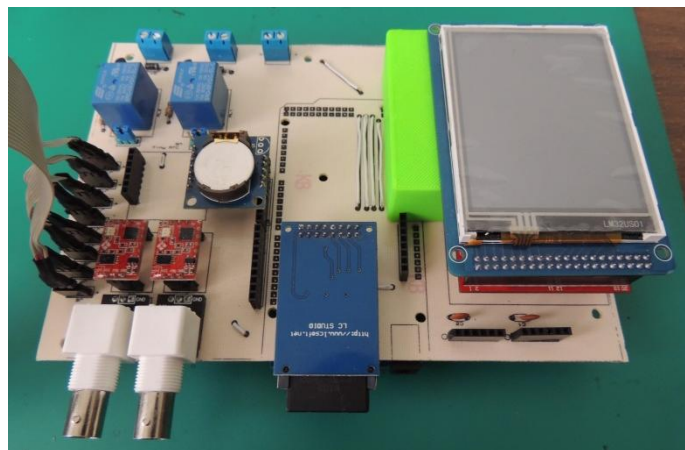


Figura 5.85 Placa de Control



Figura 5.96 Caja PLA de la placa de control.

Una vez fijados nuestros implementos electrónicos en la caja de protección eléctrica y siguiendo los diagramas de conexión eléctrica de los circuitos de control y potencia, la microplanta estuvo lista para empezar con el proceso anaeróbico (Véase Figura 5.17).



Figura 5.107 Digestores de Microplanta generadora de Biogás

CAPITULO 6

PRUEBAS

Dentro de este capítulo definiremos los parámetros fundamentales en los que se basó el ensayo, además de diseñar e implementar una microplanta generadora de biogás, es importante conocer los motivos por el cual controlamos y monitoreamos ciertos parámetros durante la digestión anaeróbica, esto con el fin de llegar a una conclusión más acertada sobre el comportamiento que tienen los parámetros físicos y químicos más importantes en el proceso anaeróbico, así como el efecto que pueden producir entre sí.

6.1 Parámetros del ensayo

Los parámetros en los que nos enfocaremos son:

Temperatura:

La temperatura es un parámetro físico, analizar dicho parámetro es muy común en la digestión anaeróbica, quizás sea el parámetro físico que más relevancia tiene en el proceso, estudios indican que el proceso anaeróbico puede darse desde los 4°C

hasta los 80 °C, sin embargo hasta la fecha ningún estudio ha sido capaz de establecer de forma específica una temperatura adecuada para una generación óptima de biogás.

Las bacterias metanogénicas son más sensibles a la temperatura que cualquier otro microorganismo dentro de un biodigestor, debido a que su velocidad de crecimiento es lenta, por tal motivo es lógico pensar que el proceso de digestión no se verá afectado mayormente si la temperatura varía en unos pocos grados “temperatura controlada”), sin embargo si el proceso de digestión es sometido a cambios amplios en la temperatura, tendrá un alto impacto en el crecimiento y reproducción de las bacterias metanogénicas sin tener gran impacto sobre las bacterias acidogénicas, esto ocasionaría una alta presencia de ácidos dentro del digestor lo cual llevaría a una falla e interrupción del proceso (Olga Rivas Solano, 2010).

Por tal motivo nuestro ensayo empleará un control de temperatura con una banda de $\pm 2^{\circ}\text{C}$, adicionalmente nos enfatizaremos en el comportamiento de las variables a una temperatura de 20 °C y 35°C durante el proceso.

Nivel de pH:

El pH por otro lado es un parámetro químico de mucha relevancia en el proceso, debido a que el valor óptimo para el digestión anaeróbica y especialmente la etapa de metanogénesis es de 6.5 – 7.5, menor que 5 o mayor que 8 puede inhibir el proceso de fermentación, normalmente cuando se trabaja con residuos domésticos y agropecuarios la dinámica del proceso ajusta el pH, sin embargo el pH se puede corregir por medio de:

- Sacando frecuentemente una pequeña cantidad de efluente y agregando materia prima en la misma cantidad
- Agregando fertilizantes, agua amoniacal diluida, licor fermentado, soluciones alcalinas o ácidas según sea el caso

El digester posee una válvula de tipo presta como ducto de control, esto con el fin de poseer un implemento que permita el ingreso de soluciones ácidas o básicas para modificar el nivel de pH y mantenerlo dentro del rango adecuado, sin embargo en este ensayo se limitó a observar el comportamiento del pH a diferentes temperaturas de operación y comprender su comportamiento a lo largo del proceso anaeróbico.

Composición química del sustrato.

La relación C/N es un parámetro químico que tiene mayor efecto en la cantidad de biogás generado en el tiempo junto con la temperatura, haciendo uso de los porcentajes de composición de carbón y nitrógeno que poseen los sustratos tal como se mostró en el capítulo 3 sobre el material de carga para la fermentación, los materiales ricos en carbón producen más cantidad de biogás y los materiales ricos en nitrógenos generan biogás en menor tiempo, Por tal motivo se ve la importancia de emplear sustratos con diferentes tipos de materiales, esto con el fin de poder tener una relación de C/N recomendable, los expertos recomiendan tener una relación entre 25:1 – 30:1 (Guevara, 1996).

En un ensayo realizado en Guayaquil se determinó que hacer uso de sangre animal aumenta considerablemente la cantidad de biogás generado, especialmente en materiales bajos en carbono como son los estiércoles de animales (C. Arellano)

Tomando como base las proporciones empleadas en dicho ensayo usaremos una mezcla de estiércol de chanco con sangre, esto con el fin de comprobar si en efecto la sangre aumenta la relación C/N de la mezcla o si la sangre tiene un mayor impacto en mantener un nivel de pH neutro, factor que garantiza un medio seguro para que las bacterias metanogénicas puedan reproducirse y a su vez el proceso de digestión anaeróbica continúe de forma continua.

Humedad:

La humedad es un parámetro físico que posee una gran importancia no solo en la concentración de sólidos totales del sustrato, sino en la transferencia de calor empleada desde nuestro sistema de calentamiento al sustrato.

Expertos afirman que para tener una humedad ideal en las mezclas, se realice una regla de dedo: mezclar de 1 litro a 2 litros de agua por kilogramo en desechos de origen animal y de 3 a 4 litros de agua por kilogramo en desechos de origen vegetal.

Sin embargo estudios realizados en la universidad del estado de Iowa sobre las propiedades térmicas en materiales orgánicos empleados en el compostaje, determinaron que dichas propiedades entre ellas la capacidad de transferencia de calor aumenta en un estado de humedad del 80% en comparación a un estado seco, lo cual favorecerá la transferencia de calor y de esa forma mantener de mejor manera la temperatura en el sustrato (Heekwon Ahn, 2009)

Por consiguiente para nuestro ensayo determinaremos de forma práctica el porcentaje de humedad inicial de nuestro sustrato, a partir del cual se determinara la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad indicada tal como se indica en el capítulo 3 sobre la concentración de carga diluida.

6.2 Procedimiento para el ensayo

A continuación indicaremos el procedimiento empleado para la puesta en marcha de nuestros digestores:

El ensayo realizado se basó en una mezcla de estiércol de chanco con sangre de animal obtenida en los camales y cantidad de agua suficiente para llevar la humedad del sustrato a una humedad mínima del 80%.

Para la determinación de la humedad inicial que posee el estiércol de chanco se empleó un método que relaciona el peso con la humedad inicial y un peso final después de aplicar un método de secado.

$$\%H = \frac{W_i - W_f}{W_i} * 100 \quad (6.1.1)$$

Dónde:

W_i = *Peso inicial del material*

W_f = *Peso del material despues de un proceso de secado*

Se tomó una muestra con un peso inicial de 150 g, los cuales fueron medidos con una balanza digital (Véase Figura 6.1).



Figura 6.1 Muestra inicial antes del proceso de secado.

Después con ayuda de un calefactor casero y la exposición del sol se dejó la materia en reposo por un lapso de 6 horas, tiempo en el cual se notó que el material perdió gran parte de su humedad llegando a un estado seco (Véase Figura 6.2)



Figura 6.2 Calefactor 110 V AC

Una vez que la muestra estuvo seca procedimos a pesarla nuevamente, dando un peso de 85 g (Véase Figura 6.3)



Figura 6.3 Muestra después del proceso de secado

Con estos datos pasamos a determinar el porcentaje de humedad del estiércol de chancho.

$$\%H = \frac{150 - 85}{150} * 100 = 43$$

Por consiguiente nuestra muestra de estiércol de chancho posee un porcentaje de humedad del 43%, con este dato hicimos uso de la siguiente fórmula para obtener los sólidos totales (ST) de nuestra muestra:

$$ST = 100 - \%H \tag{6.1.2}$$

$$ST = 100 - 43 = 57$$

Con estos datos determinamos la cantidad de agua requerida para aumentar la humedad del estiércol a una humedad mínima del 80%. Los sólidos totales para la carga diluida requerida serán:

$$ST = 100 - 80 = 20.$$

Finalmente empleamos la siguiente fórmula para determinar el volumen de agua (litros) necesario para obtener nuestra carga diluida:

$$ST_{carga\ diluida} = \frac{1Kg_{muestra} * ST_{muestra}}{1Kg_{muestra} + V_{agua}} \quad (6.1.3)$$

$$V_{agua} = \frac{ST_{muestra} - ST_{carga\ diluida}}{ST_{carga\ diluida}}$$

$$V_{agua} = \frac{57 - 20}{20} = 1.85 \frac{lbs}{kg}$$

Fue necesario emplear como mínimo 1.85 litros de agua por kilogramo de estiércol, como empleamos 5 kilogramos de estiércol eso nos da un equivalente de 9 litros de agua.

La sangre por otro lado es un compuesto molecular que presenta un alto grado de humedad cerca del 90%, por consiguiente no fue necesario realizar un cálculo de cantidad de agua para este material.

Una vez establecida la cantidad de agua requerida para nuestro ensayo pasamos a cargar los materiales en nuestros digestores. En recipientes separados teníamos los 5 kilogramos de estiércol previamente pesados, este es el primer material que pasamos a colocar (Véase Figura 6.4)



Figura 6.4 Carga de estiércol en los digestores

Como siguiente paso pasamos a colocar los 9 litros de agua, tomando de base un recipiente de 2 litros (Véase figura 6.5), cabe recalcar que el agua empleada es agua de lluvia, también se puede usar la de los pozos de agua, que son comunes en viviendas de la zona urbana, esto con el fin de evitar el uso de agua potable, debido a que esta agua es tratada con productos químicos como el cloro, el cual es nocivo para el hábitat de las bacterias metanogénicas, también hay sugerencias que indican que se puede usar el agua potable, pero hay que dejarla en reposo al medio ambiente para que el cloro contenido en el agua se evapore con el tiempo, sin embargo esta opción no es muy recomendada.



Figura 6.5 Carga de agua de lluvia en los digestores

Por ultimo pasamos a cargar los 5 kilogramos de sangre, al igual que con el estiércol, la muestra es pesada y después depositada en el digestor (Véase Figura 6.6).



Figura 6.6 Carga de sangre en los digestores

Una vez terminada la carga de nuestro sustrato pasamos a montar las tapas de nuestros digestores, fijando correctamente la tapa con el anillo mediante los pernos, adicional a esto el electrodo de pH debe estar colocado junto con los sensores de temperatura (Véase Figura 6.7).



Figura 6.7 Montaje final de la tapa, empaque, en el digestor cargado

6.3 Toma de Datos.

La toma de datos es de forma autónoma tal como se describe en el capítulo 4 “Modulo de Almacenamiento” los datos son registrados por el controlador Arduino, la placa de control posee un reloj externo el cual está encargado de mandar la señal de almacenamiento al cabo de un minuto, por este motivo no hay necesidad de que un operario este al pendiente de tomar los datos de forma manual, la lista de datos es generada en la SD en un archivo `DATALOG.TXT`, el archivo `SETPOINT.TXT` contiene únicamente los setpoints ingresados para el control de temperatura de cada tanque (Véase Figura 6.8)

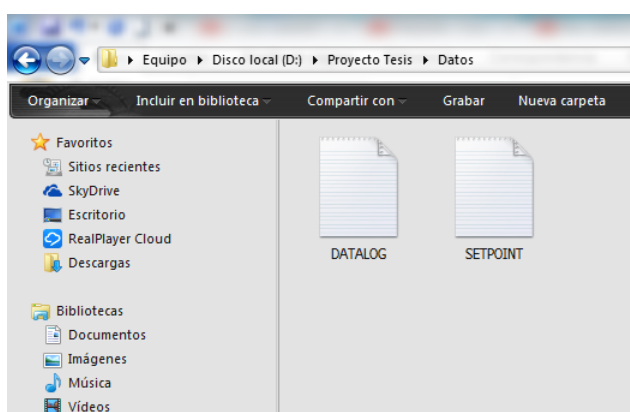


Figura 6.8 Archivos .txt generados en la SD

Una vez generados estos archivos basta con tomarlos en un ordenador y hacer uso de nuestra interfaz gráfica elaborada en Matlab, para obtener las gráficas de las variables de temperatura, presión y pH en función del tiempo.

6.4 ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo mostraremos los resultados obtenidos en los dos ensayos, las gráficas del comportamiento de temperatura en el sustrato, temperatura en el biogás, presión interna en la cámara de biogás y comportamiento del pH.

En la tabla se indica la cantidad de composición de material orgánico con el cual se procedió en los ensayos.

Tabla 6.1:

Composición de los sustratos empleados en los tanques T0 y T1, con la cantidad de agua necesaria para el proceso, se tomó un peso específico del agua de $\frac{1g}{1cm^3}$

<i>Digestor</i>	<i>Estiércol porcino [g]</i>	<i>Sangre animal [g]</i>	<i>Agua [g]</i>	<i>Peso Total [g]</i>
<i>T0</i>	<i>5000</i>	<i>5000</i>	<i>18000</i>	<i>28000</i>
<i>T1</i>	<i>5000</i>	<i>5000</i>	<i>18000</i>	<i>28000</i>

Como se puede observar nuestros sustratos emplean ambas composiciones, debido a que uno de nuestros objetivos es el control de temperatura a la cual estarán

sometidos los sustratos y observar el comportamiento de las diferentes variables durante el proceso anaeróbico.

Para el cálculo de la relación C/N utilizamos la fórmula 3.3.1 y la tabla 3.1

$$K = \frac{73*5+50.5*5}{2.6*5+13.8*5} = 7.53$$

En la tabla se muestran las condiciones de los sustratos minutos antes de la puesta en marcha de los digestores, el ensayo tuvo una duración de 16 días tiempo los sensores de presión se mantuvieron constantes, suposición con la cual se concluyó que el proceso ceso con la producción de biogás

Tabla 6.2

Descripción de los sustratos en los tanques T0 y T1

Digestor	T0	T1
<i>Origen del Estiércol</i>	<i>Porcino</i>	<i>Porcino</i>
<i>Cantidad del Estiércol</i>	<i>5 kg</i>	<i>5 kg</i>
<i>Humedad</i>	<i>0,43</i>	<i>0,43</i>
<i>Tratamiento Físico antes del ensayo</i>	<i>Ninguno</i>	<i>Ninguno</i>
<i>Origen de la Sangre</i>	<i>Pollos recién sacrificados</i>	<i>Pollos recién sacrificados</i>
<i>Cantidad de la Sangre</i>	<i>5kg</i>	<i>5kg</i>
<i>Humedad</i>	<i>90% Aprox.</i>	<i>90% Aprox.</i>
<i>Tratamiento Físico antes del ensayo</i>	<i>Ninguno</i>	<i>Ninguno</i>
<i>Origen del Agua en el sustrato</i>	<i>Lluvia</i>	<i>Lluvia</i>
<i>Cantidad de Agua</i>	<i>18 litros</i>	<i>18 litros</i>
<i>Tratamiento Físico antes del ensayo</i>	<i>Ninguno</i>	<i>Ninguno</i>
<i>Temperatura de Operación en la cámara de Agua</i>	<i>20°C</i>	<i>35°C</i>
<i>Relación C/N</i>	<i>7,53</i>	<i>7,53</i>
<i>pH inicial</i>	<i>7,54</i>	<i>6,67</i>
<i>Control en el pH</i>	<i>Ninguno</i>	<i>Ninguno</i>
<i>Presión interna en el Digestor [psi]</i>	<i>-0,101</i>	<i>-0,101</i>
<i>Tiempo total del ensayo</i>	<i>15 días</i>	<i>15 días</i>

En la tabla 6.2 se muestran las condiciones de los sustratos minutos antes de la puesta en marcha de los digestores, el ensayo tuvo una duración de 15 días tiempo

los sensores de presión se mantuvieron constantes, suposición con la cual se concluyó que el proceso cesó con la producción de biogás

6.4.1 Comportamiento de la temperatura en la cámara de agua (Sistema de Calentamiento)

Estos datos corresponden a los sensores ubicados en la camisa de agua, dichos sensores están ligados a la etapa de control de temperatura en el Sistema de Calentamiento, ya que envían la orden de encendido y apagado de las resistencias, la línea de color rojo es la línea a 20°C del set point, mientras que la línea azul es la temperatura registrada por los sensores, se puede observar que la línea azul sigue en su mayoría a la línea del set point, con esto podemos constatar que nuestro controlador funcionó correctamente, con respecto a las líneas verticales donde se registra temperaturas de -127°C son datos basura generados por el ciclo repetitivo al tomar los datos con una frecuencia de 1 minuto.

Adicional podemos observar que la temperatura al iniciar el proceso en el tanque T0 (Figura 6.9) es de 24,5 °C, desde la cual empezó a disminuir siguiendo las órdenes del controlador, a partir de la cual podemos apreciar un comportamiento uniforme de la temperatura llegando a temperaturas máximas de 22°C

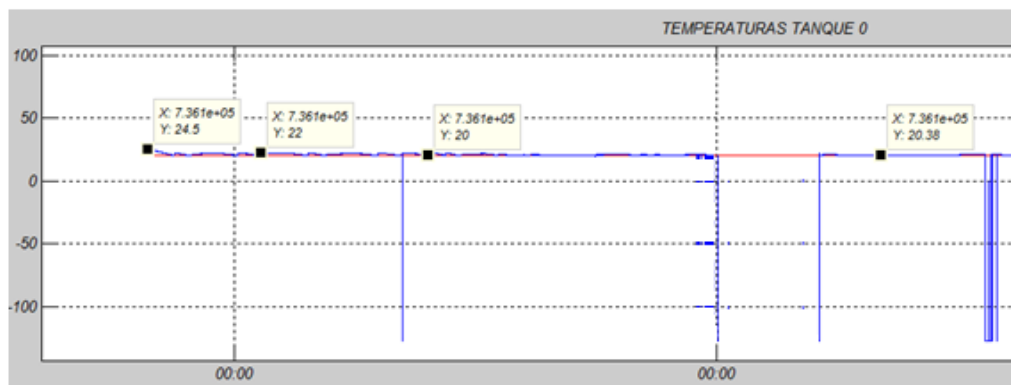


Figura 6.9 Comportamiento de controlador en el Tanque T0

Del mismo modo podemos apreciar en la figura 6.10 que la temperatura inicial para el tanque T1 fue de 21°C con la cual empezó a cambiar siguiendo al controlador, marcando temperaturas máximas de 38°C, con lo cual podemos constatar que nuestro controlador funciona bajo los parámetros establecidos.

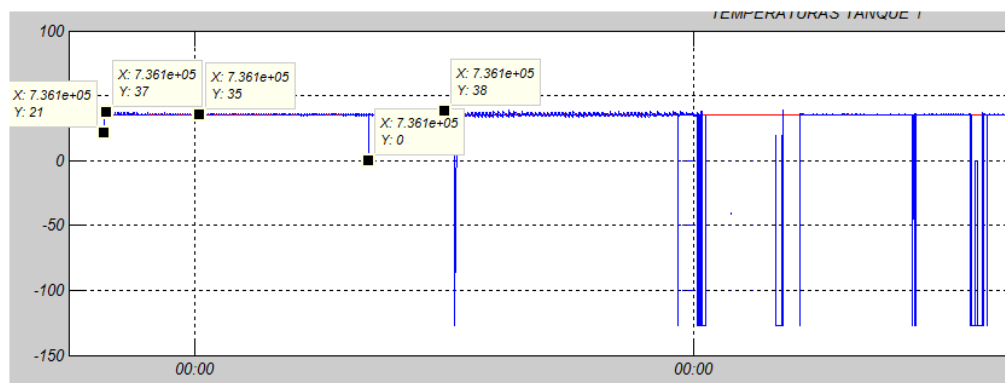


Figura 6.10 Comportamiento del controlador del Tanque T1

Adicionalmente nuestro visualizador consta de una gráfica de estado 0 a 1 la cual indica el tiempo de encendido de las resistencias, dicha grafica se mostrara más adelante para un análisis de consumo energético por parte del sistema de calentamiento.

6.4.2 Comportamiento de la temperatura dentro del Sustrato (Cámara de Fermentación)

Esta grafica muestra la temperatura a la cual estuvo sometida el sustrato en su parte central, si bien es cierto el controlador se encarga de mantener la temperatura de la cámara de agua acorde al set point ingresado, esta apenas rodea la temperatura en los extremos de nuestro sustrato, por consiguiente evaluar el comportamiento en la parte central de nuestro digestor es fundamental, esto con el fin observar la diferencia de temperatura desde los bordes a la parte central , como se puede observar en la figura 6.11, la temperatura inicial en el centro del sustrato de ambos tanques se encuentra entre el rango de 21°C a 22°C, para el tanque T0 observamos que no hay mayor cambio , ya que la temperatura que rodea al sustrato sigue un set point de 20°C, sin embargo para el tanque T1 podemos ver que conforme pasa el tiempo la temperatura en la parte interna del sustrato cambia, llegando a valores promedios de 34°C, con dicho comportamiento hemos tenido la certeza de que la geometría escogida para nuestro digestores es la idónea, ya que la trasferencia de calor se hace en su mayoría a través del eje radial, con esto tenemos la certeza de que el sustrato en su totalidad se mantiene en una temperatura que oscila entre los 38°C a los 34°C punto en el cual es el más alejado al sistema de calentamiento, de esta forma podemos estar seguro que el ensayo mantiene en lo posible una temperatura uniforme en cada punto del sustrato.

Del mismo modo podemos ver la presencia de datos basura que indican un valor de -127°C

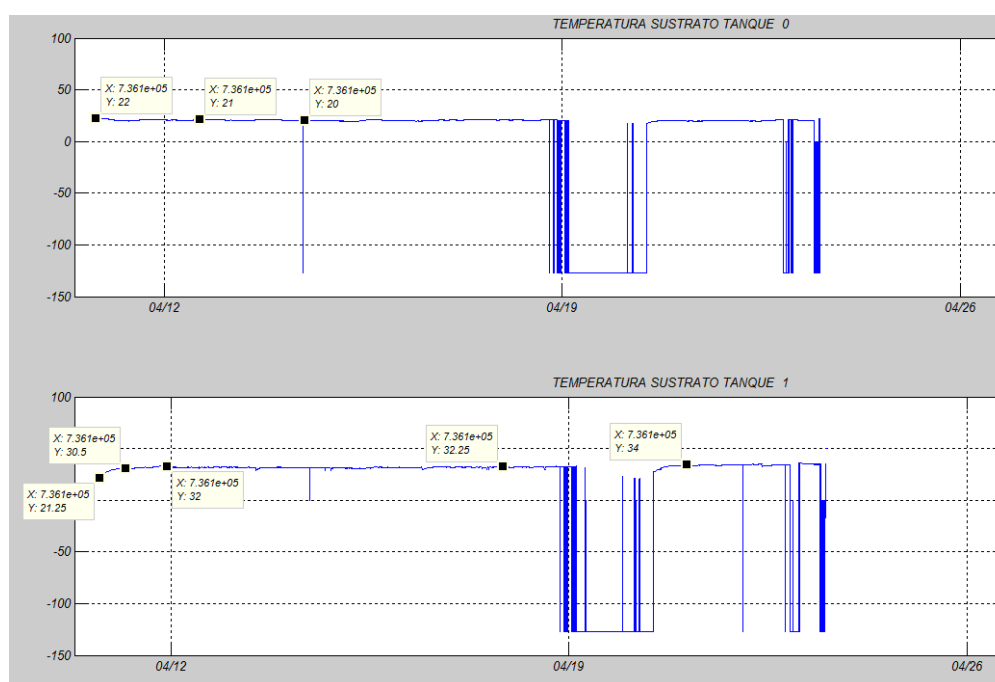


Figura 6.11 Comportamiento de las temperaturas dentro del Sustrato en los tanques T0 y T1 (Cámara de Fermentación)

6.4.3 Comportamiento de la temperatura en el biogás (Cámara de Fermentación)

Del mismo modo que en el apartado anterior los digestores constan de un sensor ubicado en la parte superior de la cámara de fermentación, dichos sensores están encargados de registrar la variación de temperatura que se da en el biogás, por efecto del control de temperatura se puede observar que en ambos tanques la temperatura en el biogás no es muy diferente a la establecida en el control de temperatura (Figura 6.12)

Para el tanque T0 la temperatura en el biogás va desde un punto bajo de 19.75°C hasta una temperatura máxima registrada de 26°C , en cambio con el tanque T1 el rango de temperatura se establece desde 26.75°C hasta una máxima de 37°C , dichos cambios en su mayoría es debido a la exposición de los tanques al sol, ya que por medio de la transferencia de calor por radiación la temperatura en las tapas de los

digestores aumenta y está a su vez por transferencia de calor por convección adicional un flujo de calor al biogás almacenado.

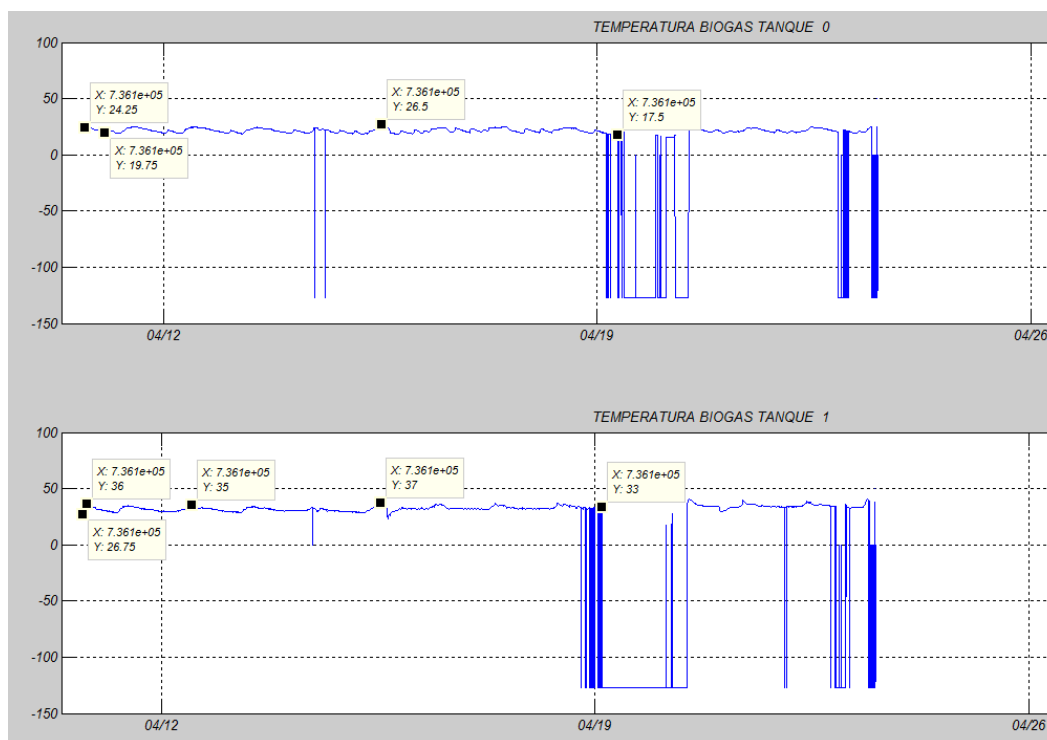


Figura 6.12 Temperaturas de biogás en ambos tanques

6.4.3 Comportamiento del pH en el Sustrato

La medición del pH se la hizo a lo largo del tiempo por parte del microcontrolador, en nuestro ensayo no se estableció aplicar un control de pH por medio de la válvula controladora de pH aplicando soluciones básicas o ácidas dependiendo del caso, debido a que nuestro objetivo es observar el comportamiento del mismo durante el transcurso del proceso.

Para el tanque T0 el valor inicial del pH fue de 7.54 pasando a estabilizarse a un valor cerca de 7 “neutro”, este estado se mantuvo alrededor de los 2 primeros días después de los cuales el valor de pH bajó a un valor de 6.71 y osciló entre ese valor y el estado neutro durante los siguientes 2 días a partir del cual el pH aumento llegando a un valor de 7.77, dicho comportamiento se mantuvo por los 2 días

siguientes, a partir del día 6 el valor de nuestro pH volvió a caer del estado neutro hasta un valor de 6.09 (Véase figura 6.13)

A partir del día 11 nuestro pH pasó de un valor cercano de 6 a un valor de 5.5 indicando que en esta etapa el ensayo pasó de un estado neutro a un estado más ácido y se mantuvo en esa zona hasta la finalización del proceso, situación que muestra una ausencia de metano (CH_4), debido a que en esta zona las bacterias metanogénicas tienen condiciones extremadamente difíciles para su subsistencia

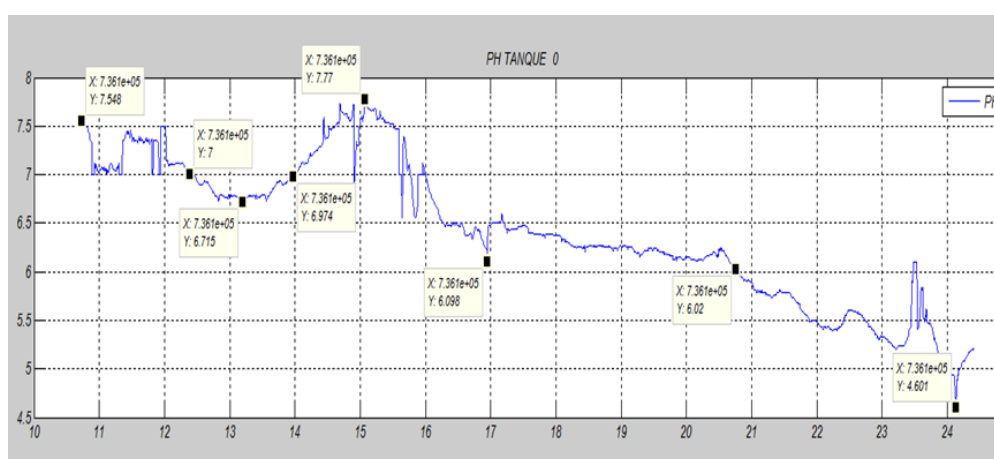


Figura 6.13 Gráfica de comportamiento del pH durante el proceso del T0

Para el tanque T1, el ensayo empezó con un valor de pH igual a 6.72, sin embargo con el transcurso de las horas nuestro pH empezó a descender hasta alcanzar un valor de 5.27 (alrededor de unas 5 horas) a partir del cual empezó a mostrar valores constantes durante los próximos 2 días, el pH continuó descendiendo hasta un valor de 4.29 dicho comportamiento se mantuvo durante los 5 primeros días de iniciado el proceso a partir de los cuales el valor de pH empezó a elevarse hasta alcanzar un valor de 6.5, el pH se mantuvo cerca de la zona neutra por los siguientes 2 días en los cuales volvió a presentar una baja de pH hasta los 5.37 nivel en el cual se mantuvo por un lapso de 1 día y medio, finalmente el valor de pH decayó

abruptamente hasta alcanzar valores de 3.36, valor en el cual se mantuvo constante hasta la finalización del proceso (Véase Figura 6.14)

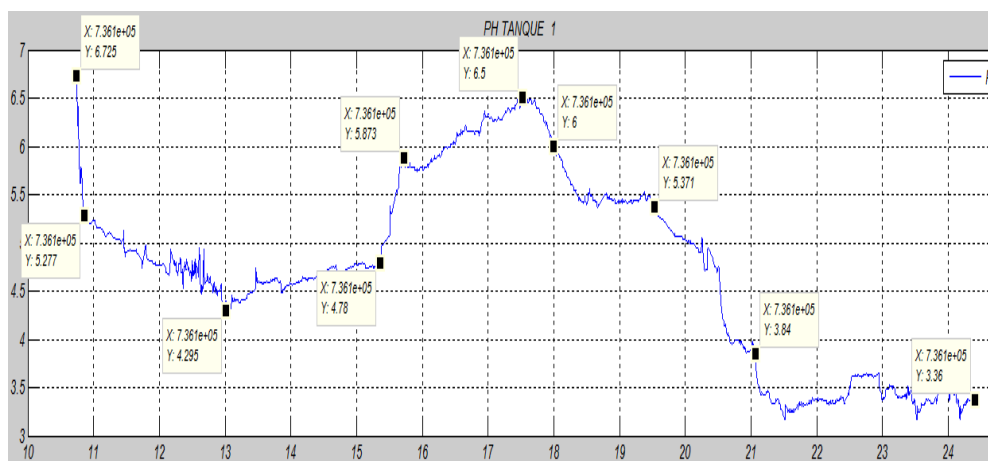


Figura 6.14 Gráfica de comportamiento del pH durante el proceso del T1

Como se puede apreciar en la *figura 6.14* el pH una vez iniciado el proceso decayó a valores de 5.27 manteniéndose por un lapso de 5 días aproximadamente en una zona ácida, zona en la cual la presencia de bacterias metanogénicas es escasa y predomina la presencia de las bacterias acidogénicas las cuales están relacionadas en las etapas de hidrólisis y acidogénesis del proceso anaeróbico durante 5 días, los valores de pH presentaron un incremento hasta de un 6.5 pasando de una zona ácida a una zona neutral, en la cual se hace constancia la presencia de las bacterias metanogénicas, dicha etapa se mantuvo por aproximadamente 3 días para después bajar a una zona ácida en la cual se mantuvo hasta dar por finalizado el proceso.

6.4.4 Comportamiento de la Presión interna en la cámara de fermentación

En ambos digestores se registraron lecturas de presión desde el primer día en que se puso en marcha los ensayos, dichas lecturas se mantuvieron a lo largo del proceso, indicando que las muestras cargadas generaron biogás y los digestores poseen una buena hermeticidad y son capaces de retenerlo. A continuación observamos el

comportamiento de las gráficas de presión en los tanques T0 y T1 (Véase Figura 6.15)

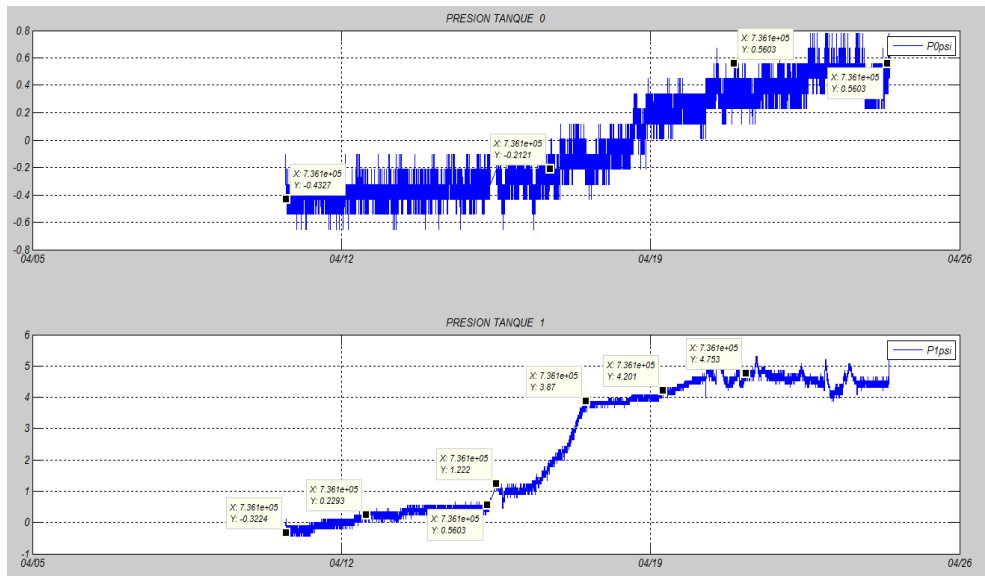


Figura 6.15 Variación de la presión manométrica en los tanques T0 y T1

Como se puede observar en la figura 6.16, para el tanque T0 se mantuvo una presión interior de -0.43 psi durante aproximadamente 5 días después de los cuales esta sufrió un ligero cambio, registrando una presión de hasta -0.21 psi, a partir de dicho día la presión interna en el tanque empezó a sufrir un incremento de hasta 0.56 psi, presión en la cual se mantiene constante hasta la finalización de los 15 días

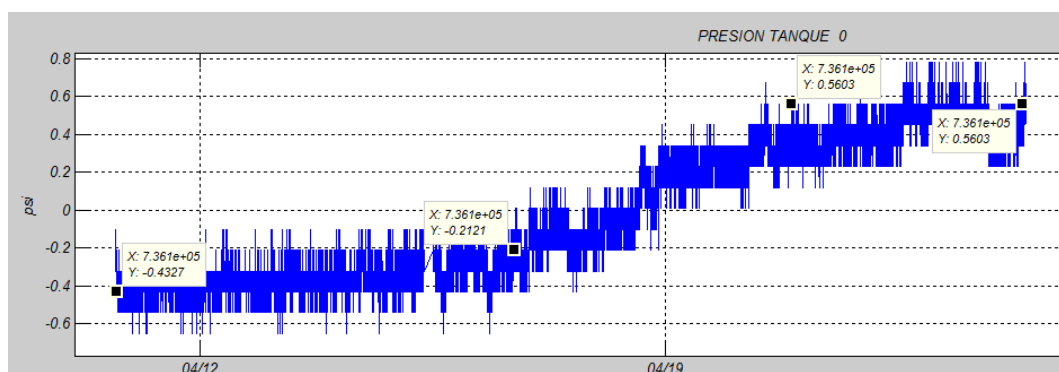


Figura 6.16 Variación de la presión manométrica tanque T0

Para el caso del tanque T1 el ensayo empezó marcando una presión de -0.322 psi sin embargo al cabo de los 2 primeros días dicha presión aumento hasta los 0.229 psi

con los cuales se mantuvo sin una variación significativa por los siguientes 2 días, sin embargo se puede observar que al cabo del 4 día la presión interna sufrió un cambio y se registró una presión de 1.22 psi que varió hasta los 3.87 psi dicho cambio se registró en el día 7 de haber empezado con el ensayo , a partir de entonces la presión se incrementó hasta los 4.7 psi pero no se mostró un cambio significativo a lo largo del tiempo, hasta que se dio por terminado el proceso (Véase figura 6.17)

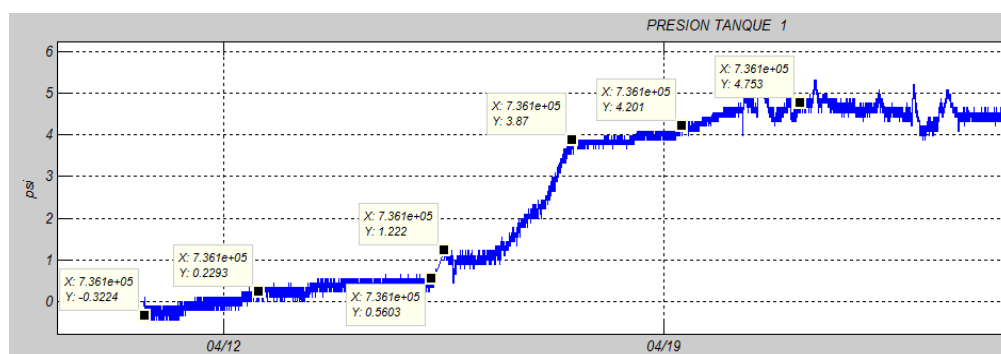


Figura 6.17 Variación de la presión manométrica tanque T1

6.4.5 Comportamiento de las gráficas de pH y Presión Interna.

Una vez analizado las gráficas de pH y Presión Interna en la cámara de fermentación de los digestores se estableció el siguiente análisis:

Con referente a las gráficas de pH y Presión en lo que se refiere al tanque T0 (Véase Figura 6.18) se puede observar que dentro de los primeros 6 días la variación de Presión es mínima partiendo de un -2.98 hasta un -1.46 kPa, durante este trayecto el pH permanece en la zona neutral, en su mayoría permanece por sobre 7, a pesar de que la producción de biogás es mínima las condiciones para el crecimiento de bacterias metanogénicas es óptima, sin embargo durante los primeros días siguiendo los parámetros del proceso Anaeróbico, nos encontramos en la etapa de Hidrólisis y Acetogénesis etapas en las que la producción de metano es mínima, a partir del día 6 se observa un incremento en los valores de presión desde -1.46 hasta los 2.34 kPa

“mayor producción de biogás en el tanque T0” en este tramo los valores de pH van desde los 7.33 hasta los 6.27, a pesar de que el pH presenta disminuciones se puede observar que el nivel de pH se encuentra dentro del rango recomendado para la supervivencia de las bacterias metanogénicas, el nivel de presión continuo hasta el día numero 11 día en el cual el nivel de pH bajo de los 6, pasando de un estado neutral a un estado ácido, estado en el que las bacterias metanogénicas empiezan a perecer por las condiciones del sustrato, a partir del día 11 el incremento de la presión es mínimo llegando hasta un 3.86 kPa, mientras que el nivel de pH continua descendiendo hasta los 4.98, de esta forma se llegó a la conclusión de que el proceso de generación había sido interrumpido.

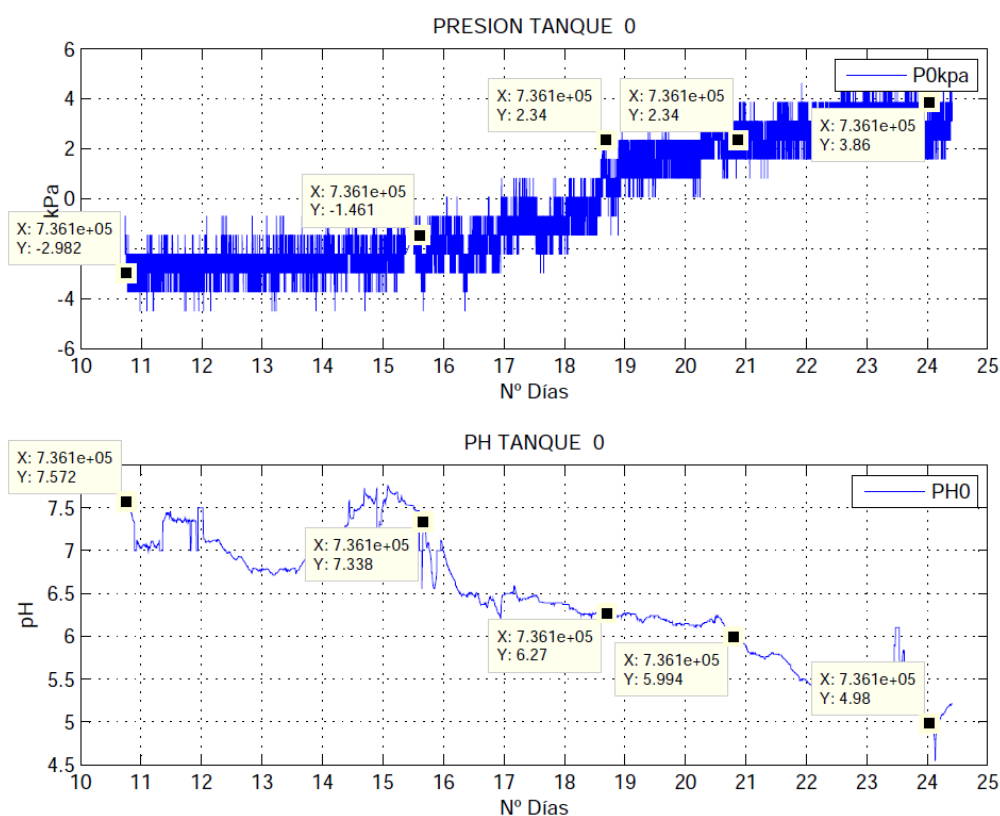


Figura 6.18 Graficas de Presión y pH del tanque T0

Los datos en el tanque T1 muestran un comportamiento diferente que el del tanque T0 aunque presenta similitudes, como el hecho de que la mayor cantidad de biogás generado es cuando los niveles de pH se encuentran en una zona neutral.

En la figura 6.19, se puede observar que dentro de los primeros 5 días se da un cambio mínimo en la presión del tanque T1 que va desde -2.22 hasta los 3.1 kPa, al mismo tiempo que se observa que el pH en el sustrato actúa en una zona ácida partiendo desde los 6.72 hasta los 5.38, este tramo nos indica el predominio de las bacterias acidogénicas con respecto a las metanogénicas, debido a que durante este proceso se producen las etapas de hidrólisis, acetogénesis y acidogénesis, en esta etapa las bacterias acidogénicas descomponen los compuestos moleculares más complejos para previamente pasar a la etapa de metanogénesis en la cual se producirá los compuestos de metano y dióxido de carbono, entre los días 5 y 6 se produce un crecimiento significativo en la presión que va desde los 8.42 hasta los 26.67 kPa “El mayor crecimiento de presión” mientras que en el pH podemos observar que pasa de un estado ácido a un estado más neutral de 6.5, en estas condiciones las bacterias metanogénicas tienen una mayor actividad bacteriana y por consiguiente existe la mayor presencia de metano, finalmente a partir del día 8 el nivel de pH baja a una zona ácida, y el nivel de presión también varía pero ya no en gran proporción cuando el pH estuvo en una zona neutral llegando hasta los 32.75 kPa y el pH decae hasta los 4.97, a partir del día 10 la presión se muestra constante mientras que el nivel de pH decae hasta los 3.48

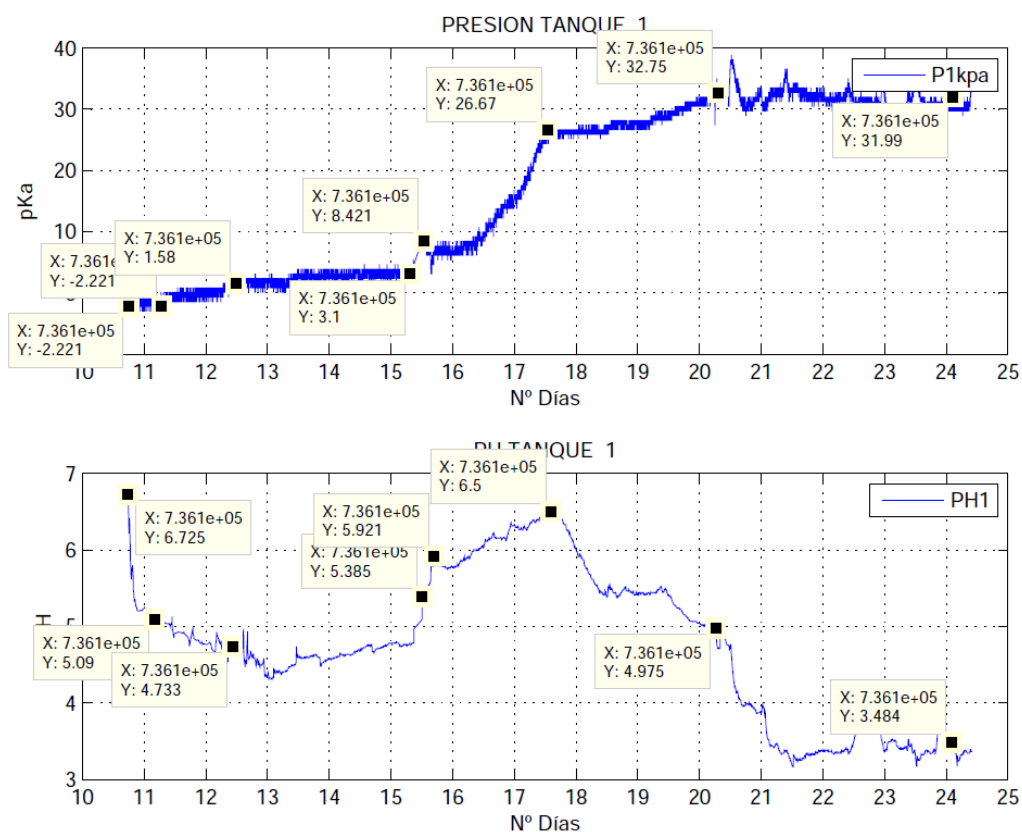


Figura 6.19 Graficas de Presión y pH del tanque T1

Como se puede constatar en ambas graficas la mayor cantidad de biogás generado es cuando los niveles de pH se encuentran en una zona neutral de 6 a 7.5, esto nos lleva a la conclusión de que mientras el pH del sustrato se halle en una zona neutral se producirá la mayor cantidad de biogás, adicional a esto en los primeros días se da una etapa de hidrólisis y acidogénesis, etapas en la que las bacterias acidogénicas predominan ante las metanogénicas, en la *gráfica* se puede observar que el nivel de pH decae a una zona acida, esto concluiría que el sustrato se ubica en una zona acida para dar inicio a la etapas de hidrólisis y acidogénesis.

Finalmente el comportamiento de las gráficas de presión del T0 con respecto al T1 se puede observar que los 15 días de presión del T0 se compara a los 5 días del T1, esto indica claramente el proceso anaeróbico en el tanque T0 no finalizó por completo y que el operar a una temperatura que supere los 30°C “zona Mesofílica”

la producción de biogás acelera considerablemente, por consiguiente se podría esperar que conforme pase el tiempo la presión en el T0 se incremente, sin embargo hay que tener muy en cuenta el comportamiento de pH, si este se vuelve a estabilizarse en una zona neutral es muy probable que las bacterias metanogénicas vuelvan a predominar ante las acidogénicas y con esto la presión aumente, dando indicios de un incremento en el biogás generado, sin embargo si el pH llega a permanecer en la zona acida, simplemente el proceso anaeróbico queda interrumpido.

6.4.6 Sustrato en los tanques después de finalizar el ensayo

Una vez concluido el proceso se procedió a retirar el sustrato o biol de cada tanque en donde se pudo constatar lo siguiente:

Para el caso del tanque T0 el sustrato final, fue un sustrato que presentaba aun cantidades de excremento y sangre como se puede observar en la figura 6.20



Figura 6.20 Sustrato del tanque T0 al finalizar el ensayo

Esto indica que el sustrato no fue procesado en su totalidad, la descomposición de los elementos o cadenas de moléculas complejas es tarea de las bacterias ácidas en la etapa de Hidrólisis y acidogénesis, comparando con los datos obtenidos por el electrodo de pH los primeros días del proceso para el tanque T0 el sustrato se

mantuvo en un nivel de pH neutral, este nivel ayuda muy poco al crecimiento y reproducción de las bacterias acidogénicas.

Por otro lado el sustrato procesado del tanque T1 presento una imagen totalmente distinta a la del tanque T0 tal como se ve en la figura 6.21



Figura 6.2 Sustrato del tanque T1 al finalizar el ensayo

El sustrato del tanque T1 presentó un color gris uniforme, los pedazos de sangre y excremento fueron desintegrados en su totalidad, por consiguiente este sustrato fue procesado en su gran mayoría, y concuerda perfectamente con las gráficas de presión interna y pH arrojadas por el ensayo en el tanque T1, el nivel de pH pasó de una zona neutral a una zona acida en cuestión de horas después de haber iniciado el experimento, esto nos deja en claro que inmediatamente las bacterias acidas entraron en acción, descomponiendo las cadenas de moléculas compuestas a moléculas más simples para que después estas sean usadas como alimento de las bacterias metanogénicas y poder obtener el CO_2 y el CH_4 , esto aclara el comportamiento registrado por el electrodo de pH en el tanque T1, el nivel de pH se dirigió a una zona ácida, zona en la que las bacterias acidogénicas pueden reproducirse de mejor manera, una vez que hicieron el trabajo de descomposición molecular, dieron paso a

las bacterias metanogénicas para que empiecen con la generación de biogás, esto respondería al comportamiento de la gráfica de pH del tanque T1, donde el nivel de pH subió desde una zona acida a una zona neutral y se produjo la mayor cantidad de biogás.

Gracias a esto podemos dejar en claro que la temperatura es un factor fundamental en el proceso anaeróbico, trabajar con temperaturas dentro del rango Mesofílico, no solo ayuda a las bacterias metanogénicas a reproducirse, acelera el proceso de las bacterias acidogénicas para que la descomposición del sustrato sea en menor tiempo.

Como indicación final podemos decir que el comportamiento de las graficas de Presión interna en el tanque T0 durante los 15 es muy similar al comportamiento de los primeros 5 días de la del tanque T1, lo cual nos da la pauta de que la temperatura del tanque T1 aceleró el proceso en una razón de 3 a 1 con respecto a la del tanque T0.

CAPITULO 7

ANALISIS FINANCIERO

7.1 Detalle de gastos

Como se puede apreciar en la tabla 7.1, el 50% de la inversión se concentra en la parte mecánica, particularmente los tanques y las tapas fabricadas en lámina de acero inoxidable. Este rubro se justifica ya que al ser un equipo de laboratorio, se requiere que los tanques se construyan en un material que sea durable y no interfiera con el proceso. En aplicaciones prácticas deberá tomarse en cuenta que un diseño continuo en tanques de polietileno puede ser suficiente para la producción de biogás para una familia pequeña, lo cual reduciría los costos en 30%.

Tabla 7.1

Detalle de gastos

CONCEPTO	Cant	C. Unid.	Costo total
Sistema mecánico			\$ 1.339,06
Tanques de Acero inoxidable lamina 3mm	2	\$ 340,00	\$ 680,00
Tapas de acero inoxidable lamina 6 mm	2	\$ 132,50	\$ 265,00
Bases para los tanques	2	\$ 40,00	\$ 80,00
Válvulas de Bola	4	\$ 2,15	\$ 8,60
Retenedores	4	\$ 7,22	\$ 28,89
Pernos M11 para la tapa	36	\$ 0,47	\$ 16,96
Empaques de polipropileno	2	\$ 75,00	\$ 150,00
Acoples neumaticos	8	\$ 4,58	\$ 36,67
Tapon fusible doble seguro	6	\$ 1,46	\$ 8,78
Uniones INOX	2	\$ 2,09	\$ 4,18
Conectores y mangueras para la tapa	6	\$ 2,00	\$ 11,98
acoples rosca interna	8	\$ 6,00	\$ 48,00
Instrumentación y sensores			\$ 787,45
Resistencias pirotubulares	4	\$ 45,00	\$ 180,00
Fuente conmutador	1	\$ 16,80	\$ 16,80
Electrodos de PH	2	\$ 49,34	\$ 98,68
Circuito de PH	2	\$ 44,10	\$ 88,20
Conector para sensor de PH	2	\$ 8,40	\$ 16,80
Cable extension para circuito de PH	2	\$ 22,06	\$ 44,11
modulo SD	1	\$ 34,65	\$ 34,65
Circuitos de Presion MPX5700	2	\$ 17,85	\$ 35,70
Arduino Mega 2560	1	\$ 60,00	\$ 60,00
Sensores de Temperatura DS18B20	8	\$ 2,36	\$ 18,90
Placa circuito Impuesto	1	\$ 47,39	\$ 47,39
Touch Panel LCD	1	\$ 38,50	\$ 38,50
Shield para TFT	1	\$ 13,70	\$ 13,70
Elementos para PCB	1	\$ 14,50	\$ 14,50
Reles de Potencia	2	\$ 31,36	\$ 62,72
Disipador para Reles	1	\$ 16,80	\$ 16,80
Equipos de protección y conexiones			\$ 298,49
Caja de control	1	\$ 35,48	\$ 35,48
Impresion 3d Piezas caja de Control	1	\$ 173,00	\$ 173,00
Conectores Molex	30	\$ 0,50	\$ 15,00
Espaguete termico	1	\$ 44,02	\$ 44,02
cable microfono (m)	8	\$ 12,99	\$ 12,99
Cable trifásico (m)	10	\$ 1,80	\$ 18,00
Varios			\$ 236,00
Gastos de importacion	1	\$ 86,00	\$ 86,00
Adhesivos, sellantes, teflon, tape etc	1	\$ 150,00	\$ 150,00
TOTAL			\$ 2.661,00

Como se puede apreciar en la tabla 7.1, el 50% de la inversión se concentra en la parte mecánica, particularmente los tanques y las tapas fabricadas en lámina de acero inoxidable. Este rubro se justifica ya que al ser un equipo de laboratorio, se requiere que los tanques se construyan en un material que sea durable y no interfiera con el proceso. En aplicaciones prácticas deberá tomarse en cuenta que un diseño continuo en tanques de polietileno puede ser suficiente para la producción de biogás para una familia pequeña, lo cual reduciría los costos en 30%.

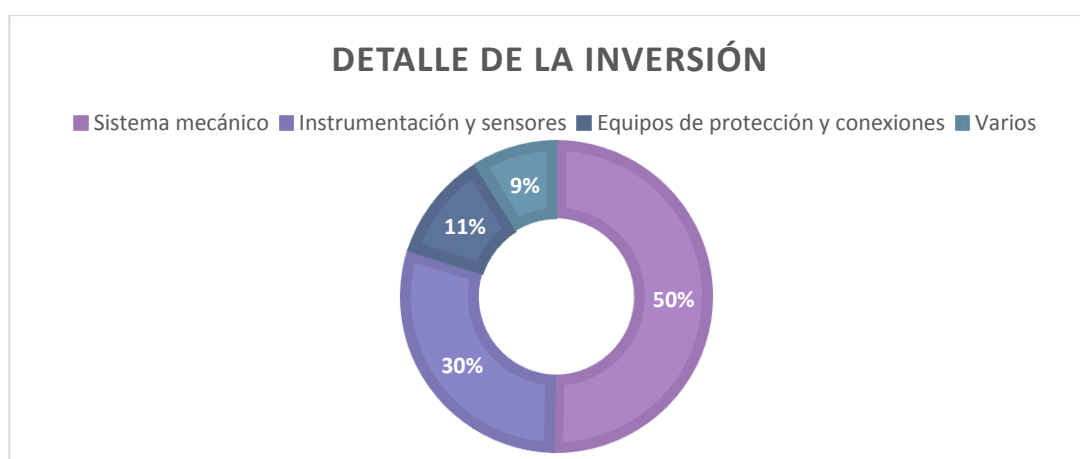


Figura 7.1 Detalle de la inversión

7.2 Análisis de la instrumentación utilizada.

Los sensores que se utilizaron en la microplanta, son de tipo gama baja y didácticos. Con electrodos de PH, sensores de presión para aplicaciones no industriales, y termistores versátiles, robustos de tipo no-industrial.

Si se hubiera considerado instrumentación de alta tecnología para la microplanta, los costos superarían los \$ 3600 vs los \$ 787 que en realidad se gastó (ver tabla). Una inversión que está fuera de la presupuestada para este proyecto. Incluso se puede agregar analizadores de la concentración de gas, pero se ha determinado que es mejor tomar una muestra y enviarla para análisis cromatográfico.

Tabla 7.2

Ejemplo de costos para una microplanta con sensores industriales

<i>Descripción</i>	<i>Cant</i>	<i>C. unid</i>	<i>C. Total</i>
<i>Sensores PT100</i>	8	\$ 176,96	\$ 1.415,68
<i>Datalogger pt100</i>	1	\$ 658,35	\$ 658,35
<i>Datalogger PH omega OM-CP-PH101</i>	2	\$ 399,00	\$ 798,00
<i>Sonda de ph omega PHE-4272</i>	2	\$ 149,00	\$ 298,00
<i>Computador para procesar los datos</i>	1	\$ 500,00	\$ 500,00
TOTAL			\$ 3.670,03

7.3 Costo de energía consumida por el equipo

Para calcular la energía consumida por el equipo es necesario conocer la potencia de las resistencias, al emplear cada tanque 2 resistencias de 1500Wh, tendremos que cada tanque consume una potencia de 3kWh.

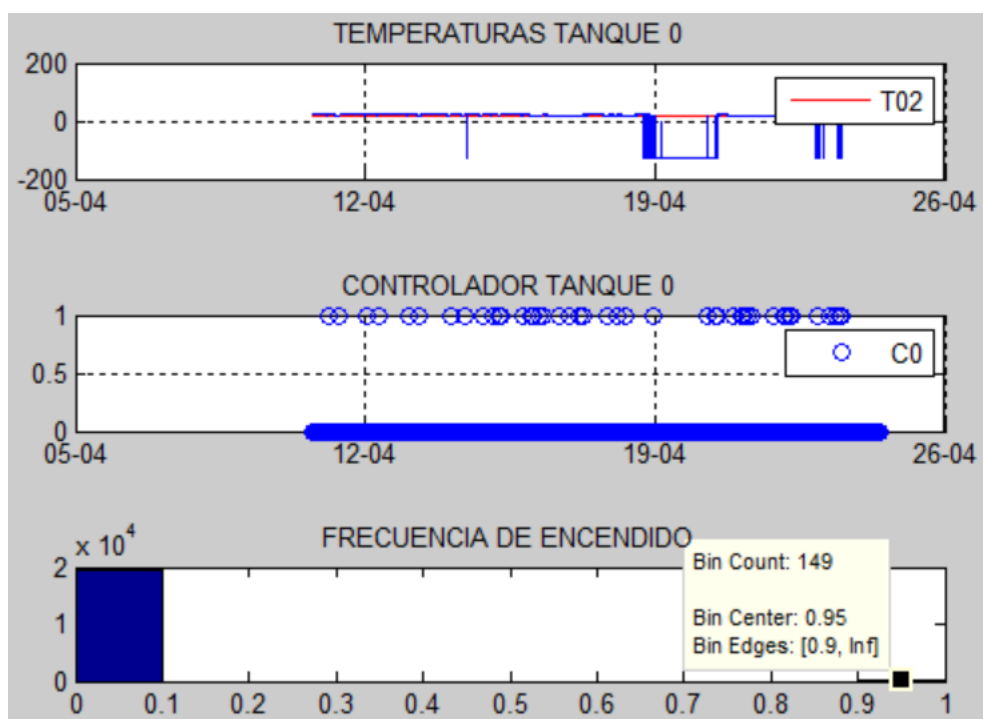


Figura 7.2 Controlador del tanque 0 activado a 20 grados

Para el tanque cero se puede observar en las gráficas, que el tiempo de encendido fueron 149 minutos, de un total de 13 días, 16 horas, 17 minutos, lo cual equivale al 0.76% del tiempo.

Para calcular la energía consumida empleamos la fórmula

$$\text{Consumo} = \text{Potencia} * \text{tiempo de operación} * \text{costo kWh} \quad (7.1)$$

$$\text{Consumo} = 3 \left[\frac{\text{kW}}{\text{h}} \right] * \frac{149}{60} [\text{h}] * 0.40 \left[\frac{\$}{\text{kWh}} \right]$$

$$\text{Consumo} = \$2.98$$

Para el tanque 1, tenemos que el tiempo total encendido fueron 728 minutos, equivalentes al 3,74% del tiempo total del ensayo, el consumo total de energía es:

$$\text{Consumo} = 3 \left[\frac{\text{kW}}{\text{h}} \right] * \frac{728}{60} [\text{h}] * 0.40 \left[\frac{\$}{\text{kWh}} \right]$$

$$\text{Consumo} = \$14.56$$

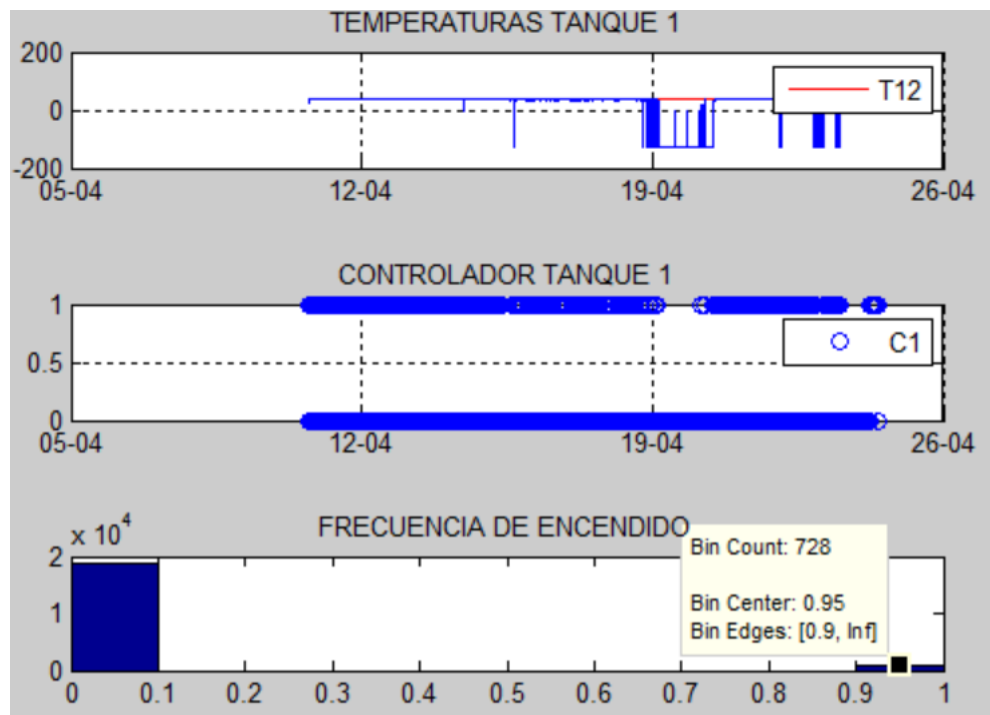


Figura 7.3 Controlador del tanque 1 activado a 35 grados.

CAPITULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación, se presentan las conclusiones relacionadas a los dos ensayos desarrollados, adicional se muestran algunas recomendaciones que podrían solucionar algunos problemas en ensayos futuros

CONCLUSIONES

La realización de estos ensayos arrojó como resultado que los digestores trabajaron tanto en una zona neutral de pH entre 7.5 hasta 6.5, zona recomendada para las bacterias metanogénicas y en zonas ácidas desde los 6.5 hasta los 5.5 zona ideal para las bacterias acidogénicas, sin embargo la mayor cantidad de biogás se generó cuando los digestores trabajaron en la zona neutral como es el caso del tanque T1 que generó de 8.42 kPa hasta los 26.67 kPa para un nivel de pH superior a los 6.5, esto liga fuertemente a que es indispensable un ambiente apropiado para que las

bacterias metanogénicas se reproduzcan ya que ellas son las principales responsables de la generación de biogás

Al finalizar los 15 días del ensayo para el tanque T1 pudimos determinar que a partir del día 11 la presión interna en el tanque se mantuvo en un valor cercano a los 26.67 kPa, al mismo tiempo el nivel de pH decayó desde los 6.5 zona neutral en la que genero el biogás hacia zonas ácidas críticas menores a 4, por consiguiente este comportamiento determina la finalización total del proceso ya que las bacterias metanogénicas no pueden sobrevivir en un medio ácido, adicional a esto el sustrato del tanque T1 no presento residuos de excremento y sangre, por lo que el sustrato fue procesado en su totalidad

El sustrato del tanque T1 fue totalmente procesado tal como se muestra en la figura 6.21, esto es un indicativo de que las bacterias ácidas fueron responsables de la descomposición molecular, para posteriormente las bacterias metanogénicas entrar en acción y producir los compuestos de CO_2 y CH_4 , por consiguiente al no haber más material orgánico que fermentar es prácticamente nulo que el nivel de pH vuelva a estabilizarse en una zona neutral para la reproducción de las bacterias metanogénicas

A lo largo de los ensayos se observó que el pH no necesariamente permanece constante, ya que desde un principio el sustrato del T1 empezó en una zona neutra de 6.72 y en cuestión de horas descendió a una zona ácida de 5.38 en la que se mantuvo aproximadamente por 5 días en este tiempo las bacterias ácidas realizaron el trabajo de descomposición molecular después el nivel de pH retomo de nuevo la zona neutral, desde 5.38 hasta los 6.5 esto indica que al tratarse de un material orgánico, la propia actividad microbacteriana regula el pH

La presencia de sangre ayuda a que el pH se estabilice en una zona neutral, para el tanque T0 7.57 y para el tanque T1 6.72 antes de iniciar el proceso, indicando que la sangre es un promotor que ayuda al crecimiento de las bacterias metanogénicas y de esa forma se de una producción de biogás.

Se presenció un mayor trabajo microbacteriano en el tanque T1 sometido a una temperatura de 35°C que llegó a obtener una presión interna de 32kPa con respecto al tanque T0 que estuvo a 20°C y obtuvo una presión interna de 3.86 kPa, a pesar de que en ambos ensayos las cargas fueron exactamente las mismas, el T1 mostró mayores cambios en los niveles de pH, desde un inicio pasó a una zona ácida donde apenas se produjo biogás para luego subir a una zona neutral en la cual se dio la mayor cantidad de biogás, esto relaciona fuertemente que la temperatura aporta de manera significativa al trabajo microbacteriano

El tiempo de funcionamiento del sistema de calentamiento eléctrico fueron menores del 5% del tiempo total de los ensayos, en el caso del tanque T0 el tiempo de funcionamiento fue de 149 minutos equivalente al 0.76% del tiempo total del ensayo y en el tanque T1 el tiempo de funcionamiento fue de 728 minutos equivalente al 3.74% del tiempo total, por consiguiente el sistema de calentamiento eléctrico es una buena opción para este tipo de procesos

Estos ensayos ayudaron a comprobar el funcionamiento de los digestores ya que a lo largo se registraron incrementos de presión interna y se mantuvieron constantes a lo largo del ensayo, esto indica que los digestores poseen una hermeticidad aceptable para el almacenamiento del biogás

Los digestores si sirven para propósitos de investigación y académicos, ya que se demostró la producción de biogás; adicionalmente los digestores cuentan con la

instrumentación necesaria para obtener datos como son la temperatura, presión interna y pH así como una interfaz de visualización amigable y una base datos capaz de tomar de forma constante y de esa forma poder hacer un seguimiento más cercano al proceso anaeróbico

RECOMENDACIONES

El pH es un factor ligado a la supervivencia de las bacterias metanogénicas, por lo que se recomienda para futuras investigaciones hacer uso de soluciones básicas o acidas para controlar el rango de operación del pH, de esa manera evitar el deterioro de las bacterias metanogénicas y así asegurar su subsistencia a lo largo del trabajo

El tanque T0 que trabajó a una temperatura de 20°C necesita un tiempo de operación más amplio en comparación al del tanque T1, ya que en los primeros días la presencia de las bacterias acidogénicas es muy pobre y estas son necesarias para la descomposición del material desde un inicio, como resultado fue la obtención de un sustrato con residuos de excremento y sangre al finalizar el proceso

El digestor presenta en sello adhesivo en la tapa, para evitar la fuga de biogás sin embargo se recomienda hacer uso de nuevo sello adhesivo cada 6 meses o emplear un empaque delgado de 2mm de caucho, esto con el fin de que en futuros ensayos no se tenga problemas de fugas de biogás

Si bien el costo del equipo resulta bastante elevado, es porque el equipo está orientado al análisis de las variables que intervienen en el proceso de biodigestión que son temperatura y PH, si se desea realizar una aplicación práctica cuyo objetivo sea el de producir biogás de forma barata y eficiente, se puede eliminar gran cantidad

de sensores y sustituir los materiales de construcción para alcanzar una variante del equipo que sea costo-efectiva.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, G. (Mayo de 2013). *Control de temperatura y PH aplicado en biodigestores modulares de estructura flexible con reciclado de lodos a pequeña escala.*

Obtenido de <http://ri.uaq.mx/bitstream/123456789/251/1/RI000009.pdf>

Almeida Oñate, J. C. (2013). Optimización de un biodigestor de 0.5 m³ para determinar las características de carga para desechos vegetales y orgánicos.

Sangolquí: ESPE.

Aprendiendo a utilizar el sensor de temperatura DS18B20. (s.f.). Recuperado de

<http://panamahitek.com/aprendiendo-utilizar-el-sensor-de-temperatura-ds18b20/>

Biotren. (2014). *Adaptador Memoria Sd Para Arduino Pic Avr.*

C. Arellano, J. C. (s.f.). *Caracterizacion de los desechos organicos del Camal de Guayaquil.* Guayaquil - Ecuador.

Carrillo, L. (2003). *Microbiologia Agricola.*

Cengel, Y. (2007). *Transferencia de Calor y Masa Tercera Edición.* Mexico: McGraw-Hi.

Cuytronic. (s.f.). *Electricidad Gratuita.* Recuperado de <http://www.electricidad-gratuita.com/>

Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011). *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction* (2 ed.). Weinheim: WILEY-VCH.

- Díaz P., M. (2012). Eliminación del sulfuro de Hidrógeno en el Biogás.
Consideraciones tecnológicas que facilitan la obtención.
- ECN Phyllis 2 Database for biomass and waste. (2012). Obtenido de
<https://www.ecn.nl/phyllis2/Browse/Standard/ECN-Phyllis#blood>
- Electricfor. (s.f.). *Resistencias Eléctricas*. Obtenido de Resistencias para inmersión:
<http://www.electricfor.es/es/16523/Resistencias-para-inmersion.htm>
- Freescale Semiconductor. (s.f.). *Datasheet MPX5700*. Recuperado de
http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPX5700.pdf
- Gestion Integral de Residuos*. (Febrero de 2010). Recuperado de Gestion Integral de Residuos:
<http://www.fio.unicen.edu.ar/usuario/esantall/q37.0/Clase%206%20-Residuos/GESTION%20INTEGRAL%20DE%20RESIDUOS.pdf>
- Guevara, A. (1996). *FUNDAMENTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS RURALES*. Lima - Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria Y Ciencias del Ambiente.
- HANYOUNG ELECTRONIC CO. (s.f.). Datasheet HSR-2D402Z. Seoul.
- Heekwon Ahn, T. J. (2009). *Determination of thermal properties of composting*. Iowa-United States.
- Hilbert, J. A. (2003). *Manual para la producción de Biogás*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – INTA. Obtenido de Instituto de Ingeniería: inta.gob.ar/.../manual-para-la-produccion-de-biogas/...
- IDAE. (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Madrid.

- ININTAE. (1983). En *COMO CONSTRUIR UN BIODIGESTOR* (pág. 28). Instituto de Investigación Tecnológica e industrial.
- Lobera Lössel, J. B. (Marzo de 2011). Obtenido de Metabioresor: [http://www.metabioresor.eu/upmedios/image/Historia%20del%20Biog%C3%A1s\(1\).pdf](http://www.metabioresor.eu/upmedios/image/Historia%20del%20Biog%C3%A1s(1).pdf)
- López M., G. A. (2011). *Producción de biogás a partir de RSU*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Lozano, S. M. (2009). Tesis Doctoral: Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña. Girona: Universidad de Girona.
- Martínez, C., Böttinger, S., & Oechsner, H. (2008). Instalaciones de biogas a mediana y gran escala en Alemania. Obtenido de <http://www.engormix.com/MA-porcicultura/manejo/articulos/instalaciones-biogas-mediana-gran-t1886/124-p0.htm>
- Maxim. (2008). *Datasheet I2C Real Time Clock DS1307*.
- Olaya, & Gonzales. (2009). *Fundamentos para el diseño de biodigestores*. Palmira: Universidad Nacional de Colombia.
- Olaya, A. Y. (2009). *Fundamentos para el diseño de biodigestores*. Palmira-Colombia.
- Olga Rivas Solano, M. F. (01 de 03 de 2010). Biodigestores: Factores químicos, físicos y biológicos relacionados con la productividad. *Tecnología en marcha*, págs. 39-46.
- Ortega R., M. (2001). *Energías Renovables*. Madrid: EDICIONES PARANINFORMA.
- Ortega Rodríguez, M. (2002). *Energías Renovables*. España: Paraninfo.

Paladini, B. (Octubre de 2012). *Recursos, energía, crecimiento económico y deuda*. .

Obtenido de <http://menospetroleo.blogspot.com/2012/10/recursos-energia-crecimiento-economico.html>

Penaloza, S. M. (s.f.). 35272890 *Calculo de Tanque Agitador*. Recuperado de <file:///D:/Proyecto%20Tesis/Informacion/35272890%20Calculo%20de%20Tanque%20Agitador.htm>

Ramos, J. A., & Hernandez, J. I. (2007). Implementación de un Biodigestor Anaeróbico Para la Generación de Energía Eléctrica a partir de Lodos Activados, Producto del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de la Ciudad de Abasolo. *Aquaforum*.

Robles, S. A. (2008). *Estudio sobre el Valor Fertilizante de los Productos del Proceso "Fermentación Anaeróbica" para Producción de Biogás*. Lima-Peru: German ProfEC.

Roman, P. (21 de 06 de 2012). *Taller Biodigestores y Biogas*. Obtenido de https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.rlc.fao.org%2Ffileadmin%2Fcontent%2Fevents%2Ftaller_tcp-par-3303%2FBiodigestor.ppt&ei=SVrxUrrVMsnfkgentYDYBQ&usg=AFQjCN GghjMqIGeN2-zkgKKunnJfBDAtZA&bvm=b

Scientific, A. (s.f.). Datasheet circuito de PH.

Universidad Central, E. (s.f.). *Simulación de Procesos Wiki Estudiantil.*, de <https://simulacionprocesos.wikispaces.com/Agitadores>

Varnero, M. T. (2011). *MANUAL DE BIOGÁS*. Obtenido de

http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/Biocomustibles/FAO/manual_

[biogas.pdf](http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/Biocomustibles/FAO/manual_biogas.pdf)

Vega, A. G. (1996). *Fundamentos Básicos para el diseño de biodigestores*

anaeróbicos. Lima: CEPIS.

Yinhai, G. H. (2014). <http://www.geldesilice.com/es>. Obtenido de

<http://www.geldesilice.com/es>: <http://www.geldesilice.com/es>