

UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA
ESCUELA DE INGENIERIA DE ALIMENTOS
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA

“DISEÑO Y AUTOMATIZACION DE UN BIODIGESTOR”

**Trabajo de Graduación previa a la obtención de los títulos de
Ingeniero Electrónico e Ingeniero en Alimentos**



Autores:

Paul Galán Chuchuca

José Proaño Piñeiros

Javier Sarmiento Vásquez

Jorge Toro Peralta

Director:

Ing. Leonel Pérez

Cuenca – Ecuador

2010

DEDICATORIA

Este logro en mi carrera se lo dedico a mi familia que me ha apoyado en las buenas y en las malas, sobre todo a mis padres que siempre me dieron una mano cuando la necesité.

También se lo dedico a aquellas personas que dudaron de mí, porque ellos me motivaron para esforzarme cada día más y cumplir esta meta.

José Proaño.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de manera especial a mis padres que siempre me apoyaron y pusieron su confianza en mí, y a mis hermanos por el apoyo y cariño brindando durante toda mi carrera.

Jorge Toro.

DEDICATORIA

Con infinito afecto, dedico este trabajo a mi madre Laura Vásquez, a mi compañera de venturas Lorena Segovia, a mis hermanos Jacqueline y Kleber y a todos mis amigos...

Javier Sarmiento.

DEDICATORIA

Con infinito cariño dedico este trabajo a todos mis familiares más cercanos, muy especialmente a mis padres: Leonardo y Yolanda y a mis hermanos Miryam, Danny, Tania y Andrea, por haber puesto su tiempo y cariño durante todo el trayecto de mi carrera, así mismo a todos los panelas que la vida me ha puesto en el camino.

Paúl Galán.

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por darme la vida y la oportunidad de poder cumplir este sueño, a mi familia que siempre me respaldó sin mirar ningún límite.

También quiero agradecer a mis profesores, que además de sus asignaturas me enseñaron a ser una mejor persona y con el tiempo un gran profesional.

A mis compañeros con los cuales aprendí mucho compartiendo el día a día.

José Proaño.

AGRADECIMIENTO

Un sincero agradecimiento a mis padres por el apoyo incondicional durante toda mi carrera.

Y a todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Electrónica que compartieron sus conocimientos con nosotros.

Jorge Toro.

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios y a mi familia por el respaldo recibido.

Muchas gracias a Lorena Segovia, mi compañera de siempre, mi apoyo incondicional.

Gracias a todos los profesores, que supieron darme una guía en el desarrollo de mi formación académica.

Gracias a los compañeros de la generación del año 2000 del colegio Benigno Malo y a los amigos de toda la vida.

Javier Sarmiento.

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por el tiempo de vida que me ha prestado para poder culminar este anhelado sueño, y un agradecimiento muy especial a mi madre Yolanda Chuchuca por nunca haber bajado los brazos ni haber desfallecido cuando más la necesite.

A todos los profesores que han sido parte de mi crecimiento. Al Dr. Tripaldi por haber perdido la paciencia solamente lo necesario durante el desarrollo de este trabajo.

Gracias a todos los panas de la vida, compañeros de tragos, parques, serenas y amanecidas. A la María de Ángeles por existir. Finalmente, gracias a toda la música del mundo por ser la inspiración de la canción de mi vida.

Paúl Galán.

RESUMEN

La descomposición de materia orgánica es utilizada para la producción de biogás en el interior de un biodigestor. El presente trabajo diseña, implementa y automatiza un biodigestor, empleando un diseño experimental 2^k a escala, controlado electrónicamente a través de un firmware desarrollado en LabView.

Se obtiene una nueva fuente de energía, controlando su temperatura, tipo de inóculo, pH y tiempo de permanencia mediante sensores electrónicos, obteniendo datos para su correspondiente análisis, logrando obtener las interacciones más favorables para una correcta fermentación, siendo colocadas estas interacciones en la construcción de un biodigestor.

ABSTRACT

The decomposition of organic matter is used for biogas production within a digester. This work designs, implements and automates a digester, using an experimental design at 2^k to scale, electronically controlled through a firmware developed in LabView.

You get a new source of energy, controlling the temperature, type of inoculum, pH, and time spent using electronic sensors, obtaining relevant data for analysis, achieving more favorable interactions for proper fermentation, these interactions being placed on building of a digester.

INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTO.....	VI
RESUMEN.....	X
ABSTRACT.....	XI
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	XII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	XVIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XX
ÍNDICE DE GRAFICOS.....	XXI
ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS.....	XXI
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XXI

INTRODUCCIÓN.....	1
--------------------------	----------

CAPÍTULO 1: BIODIGESTORES

1.1.- Conceptos y generalidades.....	3
1.2.- Clasificación.....	4
1.2.1.- De acuerdo a la frecuencia de carga de materia orgánica.....	4
1.2.1.1.- Sistema batch o discontinuo.....	4
1.2.1.2.- Sistemas semi – continuos.....	6
1.2.1.3.- Sistemas continuos.....	7
1.2.2.- De acuerdo a su estructura.....	9
1.2.3.- De acuerdo a su forma.....	9
1.2.4.- Según el almacenamiento del biogás.....	12
1.3.- Características y principio de funcionamiento.....	14

CAPÍTULO 2: FERMENTACIÓN ANAEROBIA

2.1.- Generalidades.....	18
2.2.- Fermentación anaeróbica: producción de biogás.....	20
2.3.- Etapas metabólicas involucradas en la producción de biogás.....	21

2.3.1.- Primera etapa: Hidrólisis de macromoléculas y acidogénesis.....	23
2.3.2.- Segunda etapa: Fase acetogénica.....	25
2.3.3.- Tercera etapa: Fase metanogénica.....	27
2.4.- Microorganismos de la Hidrólisis, Acidogénesis y Acetogénesis.....	27
2.4.1.- Bacterias fermentativas.....	27
2.4.2.- Bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno (H ₂).....	28
2.4.3.- Bacterias homoacéticas.....	28
2.5.- Metanogénesis.....	29
2.6.- Microorganismos responsables de la metanogénesis.....	31
2.6.1.- Arqueas metanogénicas.....	32
2.6.1.1.- Subgrupo 1.....	32
2.6.1.2.- Subgrupo 2.....	33
2.6.1.3.- Subgrupo 3.....	33
2.7.- Factores y condiciones.....	34
2.7.1.- Oxígeno (O ₂).....	34
2.7.1.1.- Demanda Biológica de oxígeno (DBO).....	34
2.7.1.2.- Demanda química de oxígeno (DQO).....	35
2.7.2.- Temperatura.....	35
2.7.3.- Potencial hidronio (pH).....	36
2.7.4.- Relación carbono/nitrógeno (C/N).....	37
2.7.5.- Tiempo de retención.....	39
2.7.6.- Homogenización.....	39

CAPÍTULO 3: DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1.- Generalidades.....	40
3.2.- Partes de un diseño experimental.....	41
3.2.1.- Experimento.....	41
3.2.2.- Matriz de diseño.....	41
3.2.3.- Unidad experimental.....	42
3.2.4.- Variables de respuesta.....	42
3.2.5.- Factores controlables.....	42
3.2.6.- Factores no controlables.....	43
3.2.7.- Niveles.....	43
3.3.- Etapas en el diseño experimental.....	44
3.4.- Clasificación de los diseños experimentales.....	44

3.5.-	Diseño experimental 2^k	45
3.6.-	Efectos en papel normal (<i>normal probability plots</i>).....	48
3.7.-	Método de mínimos cuadrados.....	50

CAPITULO 4: BIOGÁS

4.1.-	Concepto y composición química.....	53
4.2.-	Características del biogás.....	54
4.3.-	Diferencias entre en biogás y el gas natural.....	57
4.4.-	Determinaciones analíticas para cualificar y cuantificar metano.....	60

CAPÍTULO 5: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN

5.1.-	Sensores.....	62
5.1.1.-	Sensores de temperatura.....	62
5.1.1.1.-	Sensor de Temperatura LM35.....	64
5.1.2.-	Sensores de presión.....	66
5.1.2.1.-	Sensor de presión mpx2200.....	67
5.1.3.-	Sensores de pH.....	71
5.1.3.1.-	Sensor de pH electrodes - <i>Thermo-Scientific</i>	72
5.2.-	Actuadores.....	76
5.2.1.-	Electroválvula.....	76
5.2.1.1.-	Electroválvula V5J71710.....	77
5.2.2.-	Motor.....	78
5.2.2.1.-	Motor <i>Bodine Electric Company</i>	79
5.2.3.-	Niquelina.....	81
5.3.-	Diseño de la placa de control.....	82
5.3.1.-	Diseño del PCB y ruteado.....	84
5.3.2.-	Montaje.....	85
5.4.-	Diseño del firmware de controlador.....	86
5.4.1.-	Control de temperatura on/off con brecha diferencial.....	86
5.4.2.-	Actuadores.....	88
5.4.2.1.-	Configuración de puertos digitales.....	88
5.5.-	Diseño de interface del HMI.....	89
5.5.1.-	Adquisición de datos.....	90

5.5.1.1.- Creación de los canales analógicos.....	90
5.5.1.2.- Reloj de muestreo.....	91
5.5.1.3.- Lectura de los datos.....	91
5.5.1.4.- Eliminación de canal.....	92
5.5.2.- Acondicionamiento de datos.....	93
5.5.3.- Almacenamiento de datos.....	94
5.5.4.- Visualización.....	94
5.5.5.- Finalización del firmware.....	95
5.5.6.- Inicialización del firmware.....	96

CAPITULO 6: MÉTODOS Y MATERIALES

6.1.- Producción de biogás: Diseño experimental.....	98
6.2.- Biodigestores de experimentación.....	100
6.2.1.- Construcción de un biodigestor de experimentación.....	101
6.3.- Baño maría.....	106
6.4.- Conexiones.....	108
6.5.- Preparación de los experimentos de biodigestión.....	109
6.5.1.- Composición de la materia orgánica a fermentar.....	110
6.5.2.- Análisis químico de la materia orgánica.....	111
6.5.3.- Relación carbón – nitrógeno.....	111
6.5.4.- Cantidad de agua añadida a la materia orgánica a fermentar.....	112
6.5.5.- Control del pH de la materia orgánica.....	112
6.5.6.- Preparación y llenado de los biodigestores.....	113
6.6.- Tabulación, ordenamiento e interpretación de datos.....	113
6.6.1.- Toma de datos proporcionados por los sensores electrónicos.....	114
6.6.2.- Tabulación y lectura de datos.....	115
6.7.- Análisis y determinaciones químicas de la materia orgánica a fermentar..	119
6.7.1.- Determinación de materia orgánica consumida del sustrato.....	120
6.7.2.- Determinación de Nitrógeno total.....	121
6.7.3.- Determinación de metano.....	122
6.7.4.- Determinación de metano mediante cromatografía.....	123
6.7.4.1.- Cromatografía de gases como método de separación y análisis.....	124
6.7.4.2.- Resultados del cromatógrafo de gases con una muestra de biogás.....	128

CAPITULO 7: RESULTADOS

7.1.- Fase experimental.....	130
7.1.1.- Experimento N° 1.....	132
7.1.1.1.- Interpretación: experimento N° 1.....	133
7.1.2.- Experimento N° 2.....	133
7.1.2.1.- Interpretación: experimento N° 2.....	135
7.1.3.- Experimento N° 3.....	135
7.1.3.1.- Interpretación: experimento N° 3.....	136
7.1.4.- Experimento N° 4.....	136
7.1.4.1.- Interpretación: experimento N° 4.....	138
7.1.5.- Experimento N° 5.....	138
7.1.5.1.- Interpretación: experimento N° 5.....	140
7.1.6.- Experimento N° 6.....	140
7.1.6.1.- Interpretación: experimento N° 6.....	142
7.1.7.- Experimento N° 7.....	142
7.1.7.1.- Interpretación: experimento N° 7.....	145
7.1.8.- Experimento N° 8.....	145
7.1.8.1.- Interpretación: experimento N° 8.....	147
7.1.9.- Experimento N° 9.....	147
7.1.9.1.- Interpretación: experimento N° 9.....	149
7.1.10.- Experimento N° 10.....	149
7.1.10.1.- Interpretación: experimento N° 10.....	151
7.1.11.- Experimento N° 11.....	151
7.1.11.1.- Interpretación: experimento N° 11.....	152
7.1.12.- Experimento N° 12.....	153
7.1.12.1.- Interpretación: experimento N° 12.....	154
7.1.13.- Experimento N° 13.....	154
7.1.13.1.- Interpretación: experimento N° 13.....	156
7.1.14.- Experimento N° 14.....	156
7.1.14.1.- Interpretación: experimento N° 14.....	158
7.1.15.- Experimento N° 15.....	159
7.1.15.1.- Interpretación: experimento N° 15.....	161
7.1.16.- Experimento N° 16.....	161
7.1.16.1.- Interpretación: experimento N° 16.....	163
7.2.- Experimento CERO.....	163
7.3.- Tabla de resultados.....	165
7.4.- Interacción de las variables (Método de los mínimos cuadrados).....	166

7.5.- Rendimientos.....	168
7.6.- Resultados de la interacción de variables (Efectos).....	169
7.7.- Principales efectos.....	170
7.8.- Prueba piloto.....	172
CONCLUSIONES.....	175
BIBLIOGRAFIA.....	177
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS.....	177
ANEXOS.....	179

INDICE DE ILUSTRACIONES.

Figura 1.1	Biodigestor tipo batch o continuo.....	5
Figura 1.2	Biodigestor semi-continuo (modelo chino).....	6
Figura 1.3	Biodigestor semi-continuo (modelo indio).....	7
Figura 1.4	Biodigestores industriales.....	8
Figura 1.5	Distribución de una planta de biogás industrial.....	8
Figura 1.6	Biodigestor de cámara vertical cilíndrica.....	10
Figura 1.7	Biodigestor de cámara esférica.....	11
Figura 1.8	Biodigestor de cámara ovalada.....	11
Figura 1.9	Biodigestor de cámara rectangular.....	11
Figura 1.10	Biodigestor de cámara vertical cuadrada.....	12
Figura 1.11	Biodigestor de domo fijo.....	12
Figura 1.12	Biodigestor de domo móvil.....	13
Figura 1.13	Biodigestor con depósito flotante.....	13
Figura 1.14	Biodigestor con gasómetro plástico.....	14
Figura 1.15	Partes de un biodigestor.....	15
Figura 2.1	Esquema del proceso de fermentación anaeróbico.....	20
Figura 2.2	Etapas metabólicas involucradas en la producción de biogás.....	22
Figura 2.3	Hidrólisis de una molécula de proteína.....	23
Figura 2.4	Hidrólisis de una molécula de lípido.....	24
Figura 2.5	Vía metabólica de la fermentación de la glucosa.....	24
Figura 2.6	Esquema bioquímico de la metanogénesis.....	30
Figura 3.1	Factores y variables en un diseño.....	43
Figura 3.2	Clasificación de los diseños experimentales.....	45
Figura 3.3	Diseño de una matriz de experimentación.....	46
Figura 3.4	Diseño de una matriz de contrastes e interacciones.....	47
Figura 3.5	Papel probabilístico normal y sus áreas de representación gráfica.....	49
Figura 4.1	Resumen de equivalencias energéticas y usos del biogás.....	59
Figura 4.2	Análisis de sólidos y humedad de estiércol de cerdo.....	60
Figura 4.3	Análisis de sólidos y humedad de estiércol de vaca.....	60
Figura 5.1	Sensor de Temperatura.....	63
Figura 5.2	Presentación Física del LM35C.....	64
Figura 5.3	Tensión de Alimentación vs. Temperatura.....	65
Figura 5.4	Corriente de Reposo vs. Temperatura.....	65
Figura 5.5	Diagrama de Polarización del Sensor.....	66
Figura 5.6	Sensor de Presión.....	66
Figura 5.7	Presentación Física del MPX2200D.....	67
Figura 5.8	Dimensiones físicas obtenidas de la hoja de datos del MPX2200D.....	68
Figura 5.9	Comparación de especificaciones de linealidad.....	69
Figura 5.10	Salida vs Presión diferencial.....	69
Figura 5.11	Diagrama de polarización del sensor.....	71
Figura 5.12	Sensor de pH.....	72
Figura 5.13	Presentación Física del Sensor.....	73
Figura 5.14	Diagrama de polarización del sensor.....	75
Figura 5.15	Electroválvula.....	77
Figura 5.16	Presentación Física de la electroválvula.....	77
Figura 5.17	Diagrama de control del actuador.....	78
Figura 5.18	Presentación Física del Motor.....	79
Figura 5.19	Presentación Física de reducción por engranes del Motor.....	80
Figura 5.20	Diagrama del control del actuador.....	81
Figura 5.21	Presentación Física de la Niquelina.....	81

Figura 5.22	Diagrama de control del actuador.....	82
Figura 5.23	Circuito esquemático de la fuente de alimentación.....	83
Figura 5.24	Presentación del ruteo.....	84
Figura 5.25	Presentación en 3D del circuito.....	85
Figura 5.26	Presentación del circuito.....	85
Figura 5.27.a	Primer proceso del case.....	87
Figura 5.27.b	Segundo proceso del case.....	87
Figura 5.27.c	Tercer proceso del case.....	88
Figura 5.28	Creación de puertos digitales.....	89
Figura 5.29	Diagramas de bloques de la programación en LabVIEW.....	89
Figura 5.30.a	Creación de canales.....	90
Figura 5.30.b	Reloj de muestreo.....	91
Figura 5.30.c	Lectura de datos.....	92
Figura 5.31	Eliminación de canal.....	93
Figura 5.32	Acondicionamiento de datos.....	93
Figura 5.33	Almacenamiento de datos.....	94
Figura 5.34	Visualización de datos.....	95
Figura 5.35	Finalización del firmware.....	95
Figura 5.36	Inicialización del firmware.....	96
Figura 5.37	Diagrama de Bloques	96
Figura 5.38	Panel frontal.....	97
Figura 6.1	Flujo del diseño experimental para la producción de biogás.....	99
Figura 6.2	Esquema del montaje de sensores y venoclisis.....	103
Figura 6.3	DAQ NATIONAL INSTRUMENTS USB 6008.....	104
Figura 6.4	Esquema de un biodigestor para la experimentación.....	105
Figura 6.5	Panel de control LabVIEW®.....	114
Figura 6.6	Interpretación de los datos recogidos y tabulados en Excel®.....	115
Figura 6.7	Datos recogidos en un experimento y tabulados en Excel®.....	116
Figura 6.8	Curva para la conversión de unidades de los datos recogidos por el sensor de presión Motorola® MPX220D.....	117
Figura 6.9	Datos recogidos por los sensores electrónicos y convertidos a sus correspondientes unidades en una hoja de Excel®.....	118
Figura 6.10	Grafica de la variación de presión por el tiempo transcurrido en días.....	119
Figura 6.11	Componentes importantes de un cromatógrafo de gases.....	125
Figura 6.12	Cromatograma de una muestra de biogás generado tras la experimentación.....	127
Figura A2.1	Presentación de la carcasa principal y ubicación de elementos.....	180
Figura A2.2	Ubicación física del circuito en la placa.....	181
Figura A2.3	Ubicación física del circuito en la placa.....	181
Figura A2.4	Presentación física de los actuadores.....	182
Figura A2.5	Ubicación física del circuito en la placa.....	182
Figura A2.6	Presentación física de los Sensores.....	183

INDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1	Cuadro de los microorganismos presentes en la fermentación.....	21
Tabla 2.2	Metabolitos obtenidos en la segunda etapa de fermentación.....	26
Tabla 2.3	Principales reacciones de metanización con diferentes sustratos.....	30
Tabla 2.4	Límites de potencial hidronio (pH).....	37
Tabla 2.5	Relación carbono/nitrógeno (C/N).....	38
Tabla 2.6	Rangos de temperatura y el tiempo de retención.....	39
Tabla 3.1	Esquema de implementación de un diseño experimental.....	44
Tabla 4.1.-	Propiedades físicas de gas metano.....	54
Tabla 4.2.-	Composición química del biogás.....	54
Tabla 4.3.-	Resumen de características de los componentes del biogás.....	57
Tabla 4.4.-	Concentraciones típicas de diferentes elementos en biogás y gas natural.....	58
Tabla 6.1	Variables y respuesta del diseño experimental.....	99
Tabla 6.2	Matriz experimental 2 ⁴ para biogás.....	100
Tabla 6.3	Composición y porcentajes de materia orgánica a fermentar.....	111
Tabla 6.4	Relación Carbono: Nitrógeno de diversos desechos disponibles.....	112
Tabla 6.5	Fases estacionarias líquidas de uso común en cromatografías.....	126
Tabla 6.6	Conductividad térmica de algunos gases.....	127
Tabla 6.7.-	Tiempos en los cuales se inflamaron las muestras analizadas en el cromatógrafo de gases.....	129
Tabla 6.8.-	Parámetros de calibración del cromatógrafo de gases empleado en el análisis de biogás generado en la experimentación.....	129
Tabla 7.1	Variables representativas para el análisis de producción de biogás....	130
Tabla 7.2	Número de experimentos y las variables para cada evaluación.....	131
Tabla 7.3	Condiciones de experimentación de la primera carga.....	132
Tabla 7.4	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 1).....	132
Tabla 7.5	Condiciones de experimentación de la segunda carga.....	133
Tabla 7.6	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 2).....	134
Tabla 7.7	Condiciones de experimentación de la tercera carga.....	135
Tabla 7.8	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 3).....	135
Tabla 7.9	Condiciones de experimentación de la cuarta carga.....	137
Tabla 7.10	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 4).....	137
Tabla 7.11	Condiciones de experimentación de la quinta carga.....	138
Tabla 7.12	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 5).....	139
Tabla 7.13	Condiciones de experimentación de la sexta carga.....	140
Tabla 7.14	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 6).....	141
Tabla 7.15	Condiciones de experimentación de la séptima carga.....	143
Tabla 7.16	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 7).....	144
Tabla 7.17	Condiciones de experimentación de la octava carga.....	145
Tabla 7.18	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 8).....	146
Tabla 7.19	Condiciones de experimentación de la novena carga.....	148
Tabla 7.20	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 9).....	148
Tabla 7.21	Condiciones de experimentación de la décima carga.....	149
Tabla 7.22	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 10).....	150
Tabla 7.23	Condiciones de experimentación de la décima primera carga.....	151
Tabla 7.24	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 11).....	152
Tabla 7.25	Condiciones de experimentación de la décima segunda carga.....	153
Tabla 7.26	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 12).....	153
Tabla 7.27	Condiciones de experimentación de la décima tercera carga.....	155
Tabla 7.28	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 13).....	155
Tabla 7.29	Condiciones de experimentación de la décima cuarta carga.....	157
Tabla 7.30	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 14).....	157

Tabla 7.31	Condiciones de experimentación de la décima quinta carga.....	159
Tabla 7.32	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 15).....	160
Tabla 7.33	Condiciones de experimentación de la décima sexta carga.....	161
Tabla 7.34	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 16).....	162
Tabla 7.35	Condiciones de experimentación de la carga de referencia.....	164
Tabla 7.36	Variación de presión vs. Tiempo (experimento CERO).....	164
Tabla 7.37	Resultados de la variación de presión.....	166
Tabla 7.38	Interacción de las variables de estudio.....	167
Tabla 7.39	Rendimiento individual de los experimentos.....	168
Tabla 7.40	Efecto de las interacciones.....	170
Tabla 7.41	Cuadro de datos para normal Plot.....	171
Tabla 7.42	Variación de presión vs. Tiempo (prueba piloto).....	173

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 7.1	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 1).....	133
Gráfico 7.2	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 2).....	134
Gráfico 7.3	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 3).....	136
Gráfico 7.4	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 4).....	137
Gráfico 7.5	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 5).....	138
Gráfico 7.6	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 6).....	142
Gráfico 7.7	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 7).....	143
Gráfico 7.8	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 8).....	147
Gráfico 7.9	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 9).....	149
Gráfico 7.10	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 10).....	150
Gráfico 7.11	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 11).....	151
Gráfico 7.12	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 12).....	154
Gráfico 7.13	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 13).....	156
Gráfico 7.14	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 14).....	168
Gráfico 7.15	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 15).....	159
Gráfico 7.16	Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 16).....	163
Gráfico 7.17	Variación de presión vs. Tiempo (experimento CERO).....	165
Gráfico 7.18	Interacción.....	171
Gráfico 7.19	Variación de presión vs. Tiempo (prueba piloto).....	172

INDICE DE FOTOGRAFIAS

Fotografía 6.1	Tapón de goma colocado en la tapa de uno de los recipientes.....	102
Fotografía 6.2	Tapa del biodigestor con los sensores montados.....	102
Fotografía 6.3	Toma de muestras (pinza Hoffman).....	104
Fotografía 6.4	Biodigestor con materia orgánica.....	106
Fotografía 6.5	Baño María con los biodigestores inmersos en él.....	107
Fotografía 6.6	Biodigestores funcionando.....	108
Fotografía 6.7	Protoboard.....	109
Fotografía 6.8	Bolsa conteniendo desperdicios orgánicos recogidos.....	110

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1	Lista de materiales obtenida del reporte de prótel.....	179
Anexo 2	Funciones y Puertos del equipo.....	180

Galán Chuchuca Paúl Patricio

Proaño Piñeiros José Miguel

Sarmiento Vásquez Carlos Javier

Toro Peralta Jorge Luis

Trabajo de Graduación

Ing. Leonel Pérez

Septiembre - 2010

“ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE PRODUCCIÓN DE BIOGAS A PARTIR DE DESECHOS VEGETALES MEDIANTE DISEÑO EXPERIMENTAL Y APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR DE CONDICIONES CONTROLABLES”

INTRODUCCION

En la actualidad es bien conocido el problema que resultan ser los desechos orgánicos procedentes de la producción de alimentos elaborados industrialmente, debido en parte al gran espacio físico que ocupan, al costo de su manejo y transporte, al impacto ambiental que ocasiona su eliminación en los vertederos locales y el valor monetario con el que cuentan puesto que son parte de la materia prima comprada para la producción.

Por otra parte se deben tomar en cuenta los costos de energía que son necesarios para la elaboración de alimentos, ya sean estos para cocción, esterilización de envases y producto terminado, refrigeración, etc., que industrialmente hablando, son altos.

Al momento las industrias de alimentos utilizan combustibles derivados del petróleo, los cuales se encarecen y escasean con el pasar de los días, y debido a su gran demanda como fuente de energía, sus precios constantemente están en aumento. Además, su combustión contribuye enormemente a la acumulación de gases de invernadero, convirtiéndose en un agente contaminante del ambiente.

En base al avance y el desarrollo tecnológico que se ha venido dando a través de los años se ha efectuado una investigación que tiene como objetivo el diseño y automatización de un biodigestor, para la producción de biogás.

Estos sensores y actuadores son controlados mediante un hardware, el cual está formado por una placa que contiene componentes electrónicos, diseñado mediante un software Prútel 99, los cuales a su vez son comandados mediante un firmware, desarrollado en un software LabVIEW 8.2, siendo este un instrumento virtual que comprende de un módulo de adquisición de datos y que permite enviar y recibir señales a través de sus canales analógicos y digitales.

El proceso de biogás es controlado automáticamente midiendo las variables de: temperatura, presión y acidez utilizando los sensores adecuados. El control automático garantiza la calidad del biogás obtenido.

Los actuadores tales como el motor, la niquelina y la electroválvula tienen la función de mantener un ambiente estable y homogéneo para obtener la mayor cantidad de biogás posible.

CAPITULO I

BIODIGESTORES

1.1 Conceptos y generalidades

Un digestor de desechos orgánicos o biodigestor es, en su forma general, un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (sea este animal, vegetal o una mezcla de ambos).

Este sistema también puede incluir una cámara de carga y nivelación del agua residual antes del reactor, un dispositivo para captar y almacenar el biogás y cámaras de presión de agua y tratamiento posterior (filtro y piedras, de algas, secado, entre otros) a la salida del reactor.

El fenómeno de biodigestión se da debido a la existencia de un grupo de microorganismos bacterianos anaeróbicos presentes en el material fecal que, al actuar sobre los desechos orgánicos de origen vegetal y animal, producen una mezcla de gases con alto contenido de metano (CH_4) denominado biogás, sumamente eficiente si se emplea como combustible. Como resultado de este proceso se generan residuos con un alto grado de concentración de nutrientes y materia orgánica (ideales como fertilizantes) que pueden ser aplicados frescos, pues el tratamiento anaerobio elimina los malos olores y la proliferación de insectos.

Se deben controlar ciertas condiciones pH, presión y temperatura a fin de que se pueda obtener un óptimo rendimiento.

El biodigestor es un sistema sencillo de implementar con materiales económicos y se está introduciendo en comunidades rurales aisladas y de países subdesarrollados para obtener el doble beneficio de conseguir solventar la problemática energética-ambiental, así como realizar un adecuado manejo de los residuos tanto humanos como animales y vegetales. (Solís, 2007).

1.2 Clasificación

Los biodigestores se pueden clasificar de acuerdo a los siguientes parámetros.

1.2.1 De acuerdo a la frecuencia de carga de materia orgánica

De acuerdo a la frecuencia del cargado de la materia orgánica, los sistemas de biodigestores productores de biogás se pueden clasificar en: Discontinuos o batch, semi – continuos y continuos.

1.2.1.1 Sistema batch o discontinuo

Este tipo de digestor se carga totalmente de una sola vez y la descarga se realiza una vez que la producción de biogás ha cesado. Generalmente consiste en un tanque cerrado herméticamente el cual está conectado a un depósito conocido como gasómetro, en el cual se almacena el gas generado. Este sistema se emplea principalmente cuando la materia a procesar se obtiene intermitentemente, por lo que es necesario conectar varios de estos digestores e irlos cargando a diferentes tiempos para que la obtención de biogás sea constante.

El sistema batch es ideal para ser utilizado a nivel de laboratorio para evaluar parámetros de generación de gas y comportamiento de los residuos orgánicos. Su construcción y carga son sencillos de realizar y se llega a conseguir una generación de gas de hasta 1:1 en relación a la carga.

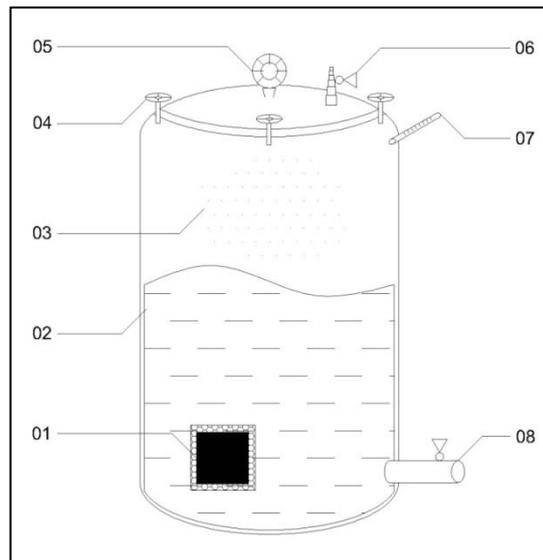


Figura 1.1.- Biodigestor tipo batch o continuo.

De la figura 1.1:

- 01 Ventanilla de visión interna
- 02 Materia orgánica
- 03 Cuerpo del biodigestor
- 04 Tornillos de seguridad
- 05 Manómetro
- 06 Válvula de salida del biogás
- 07 Termómetro
- 08 Válvula de salida de subproductos

1.2.1.2 Sistemas semi – continuos

Es el tipo de biodigestor más empleado en el sector rural para uso doméstico. Comúnmente son contenedores verticales que han sido enterrados y se cargan una sola vez por día por medio de la gravedad, el volumen de carga orgánica depende del tiempo de fermentación o retención y la cantidad de biogás generado es más o menos constante si son mantenidas las condiciones de operación. No necesita gasómetro puesto que el gas se almacena en el mismo cuerpo del biodigestor, desplazando al exterior la materia orgánica ya fermentada, por medio de la presión generada.

Existen dos tipos principales de biodigestores semi - continuos: el modelo indio, en el cual su parte superior o domo es flotante y el modelo chino en el cual su domo es fijo. La baja aceptabilidad de estos digestores ha sido principalmente por sus altos costos de construcción y dificultad de instalación.

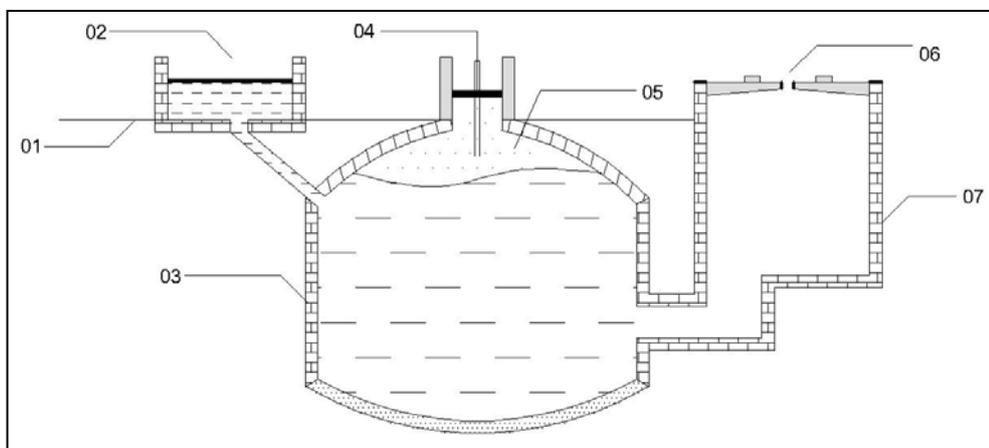


Figura 1.2.- Biodigestor semi-continuo (modelo chino).

- 01 Nivel del suelo
- 02 Entrada de materia orgánica
- 03 Construcción de ladrillo
- 04 Tapa de acero y salida de biogás

05 Almacenamiento de biogás

06 Salida de subproductos

07 Tanque de desplazamiento

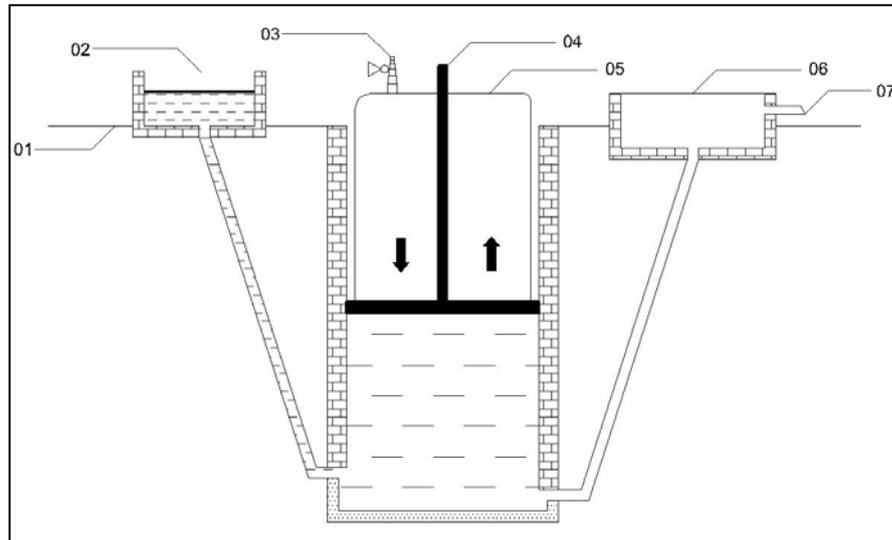


Figura 1.3.- Biodigestor semi-continuo (modelo indio)

01 Nivel del suelo

02 Entrada de materia orgánica

03 Salida del biogás generado

04 Eje del gasómetro

05 Gasómetro móvil o domo flotante

06 Depósito de descarga

07 Salida de subproductos

1.2.1.3 Sistemas continuos

Esta clase de biodigestores son principalmente empleados para el tratamiento de aguas residuales. Generalmente son grandes instalaciones en donde es necesario equipos especializados para su alimentación, calefacción y agitación así como para su control. Por lo tanto estos digestores son de tipo industrial, en los cuales se

genera gran cantidad de biogás para su uso en la industria y son especialmente utilizados para el tratamiento de aguas negras de las ciudades. Como son biodigestores de régimen continuo, es necesario que estos estén interconectados en serie para que la producción no se detenga mientras están siendo alimentados con nueva materia orgánica.



Figura 1.4.- Biodigestores industriales.

Fuente: Ison, Biodigestores: usos tradicionales y nuevas aplicaciones, <http://www.ison21.es/2007/12/08/biodigestores-usos-tradicionales-y-nuevas-aplicaciones/2007>

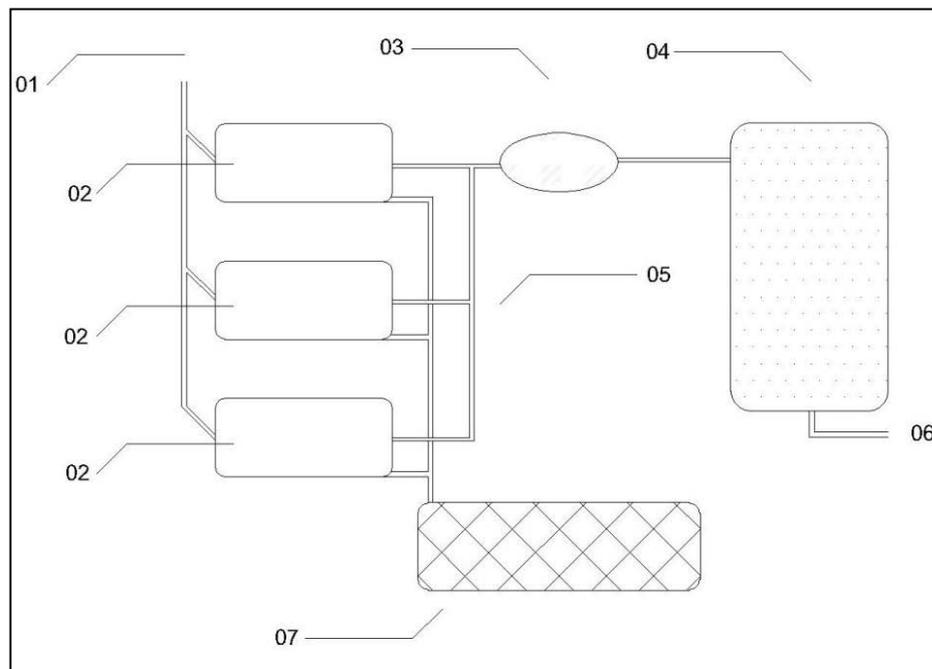


Figura 1.5.- Distribución de una planta de biogás industrial.

- 01 Afluentes
- 02 Biodigestores
- 03 Compresor
- 04 Gasómetro
- 05 Salida de biogás producido
- 06 Distribuidor de biogás
- 07 Depósito de efluentes

1.2.2 De acuerdo a su estructura.

Por su estructura geométrica los biodigestores metanogénicos pueden agruparse en los siguientes diseños:

- Digestores de ladrillo,
- de mampostería,
- de hormigón,
- de hormigón armado,
- de materiales plásticos
- de metales como el acero inoxidable.

1.2.3 De acuerdo a su forma

Los biodigestores también se han desarrollado de diferentes formas geométricas para facilitar o mejorar el proceso de fermentación y la utilización del biogás obtenido, por esta razón a continuación nombramos la principal clasificación de acuerdo a su forma geométrica.

- Digestores de cámara vertical cilíndrica,
- de cámara esférica,
- de cámara ovalada,
- de cámara rectangular,
- de cámara cuadrada.

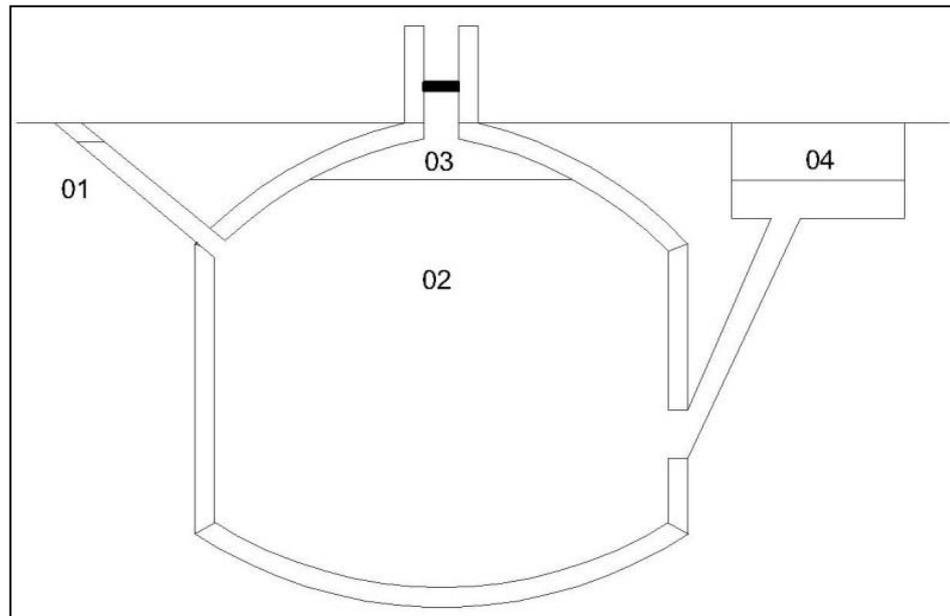


Figura 1.6.- Biodigestor de cámara vertical cilíndrica

01 Entrada de materia orgánica

02 Cámara de fermentación

03 Depósito de gas

04 Salida de efluentes

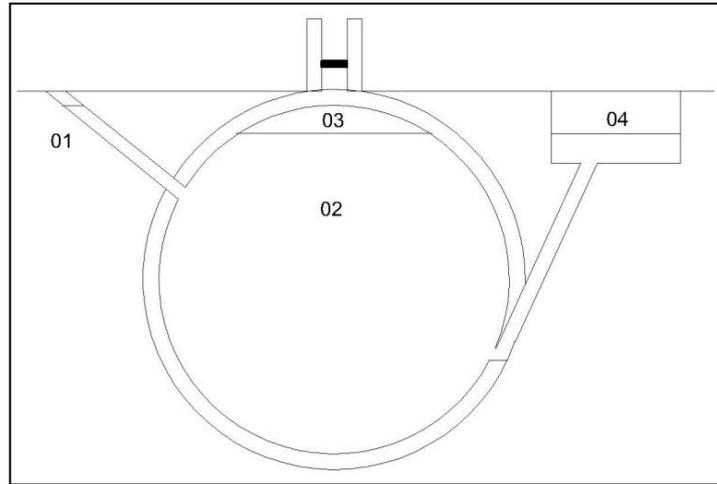


Figura 1.7.- Biodigestor de cámara esférica

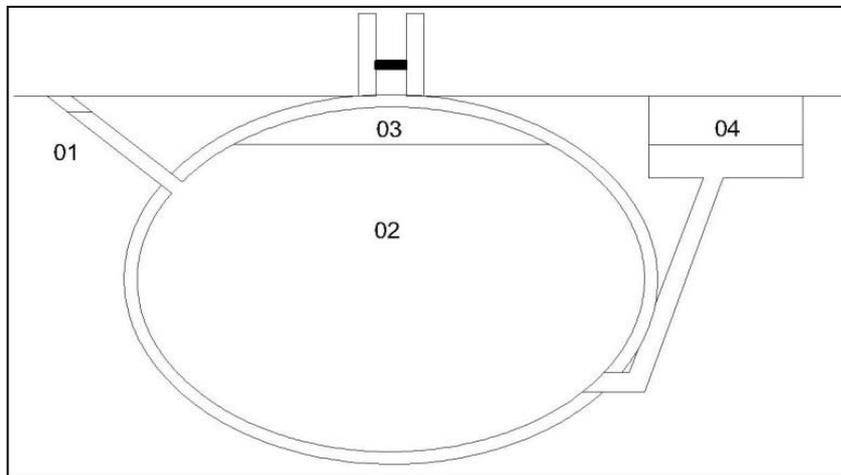


Figura 1.8.- Biodigestor de cámara ovalada

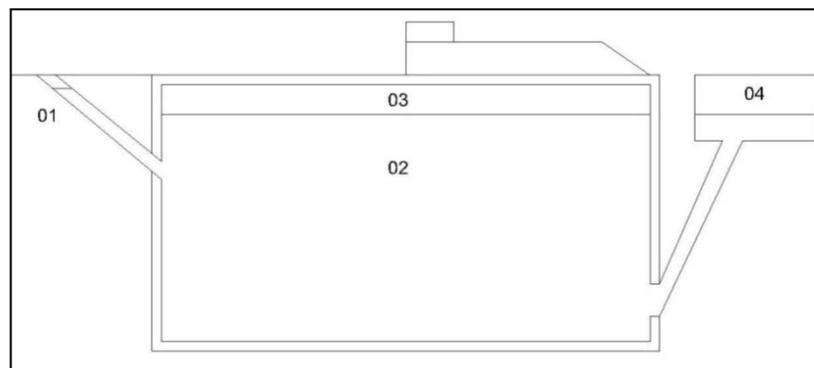


Figura 1.9.- Biodigestor de cámara rectangular

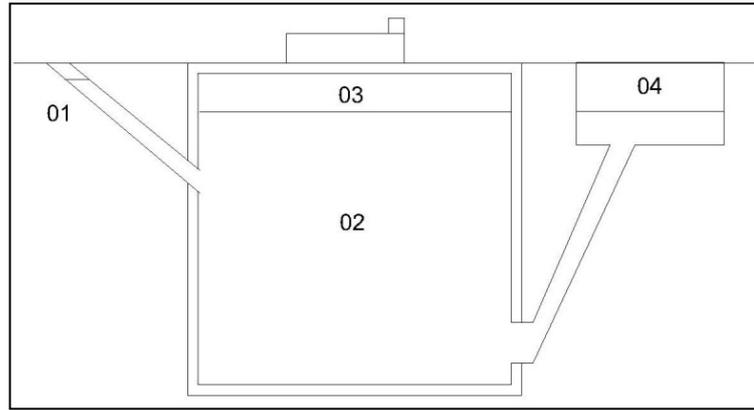


Figura 1.10.- Biodigestor de cámara vertical cuadrada

1.2.4 Según el almacenamiento del biogás:

Domo fijo: el biogás generado no es almacenado por mucho tiempo, se distribuye casi inmediatamente para su utilización en quemadores. Son comúnmente de sistema semi-continuo de llenado y tienen el problema de sobre presionarse si no se emplea constantemente el gas producido.

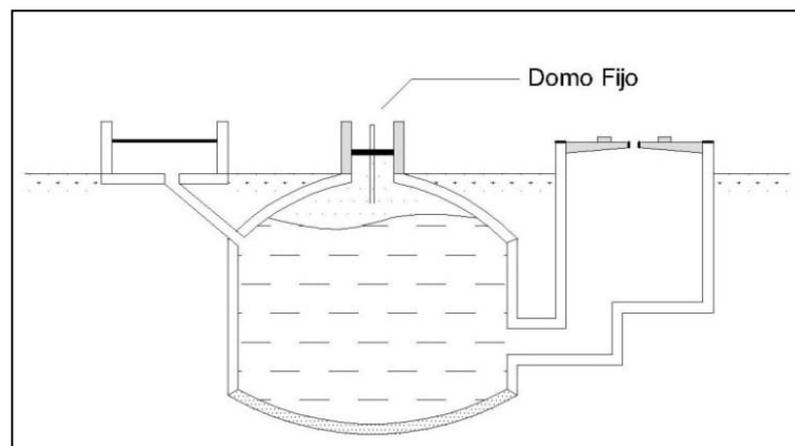


Figura 1.11.- Biodigestor de domo fijo

Domo móvil: la presión generada en el interior se mantiene constante puesto que la cúpula del digester se eleva a medida que aumenta la producción de biogás. La presión de salida de biogás es constante y no existe mayor riesgo de explosión por sobrepresión.

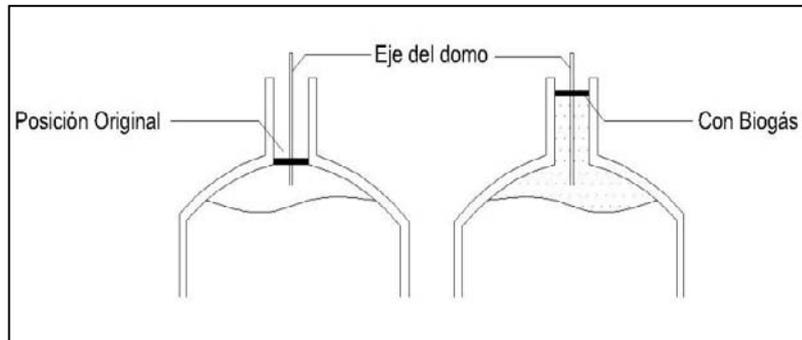


Figura 1.12.- Biodigestor de domo móvil

Con depósito flotante o presión constante: el gasómetro o depósito de gas es externo al digester. El gas es almacenado en este depósito a presión constante, debido a la movilidad con la cuenta este al estar suspendido sobre agua, al aumentar el gas generado este desplaza el agua de su interior, dando cabida al biogás producido.

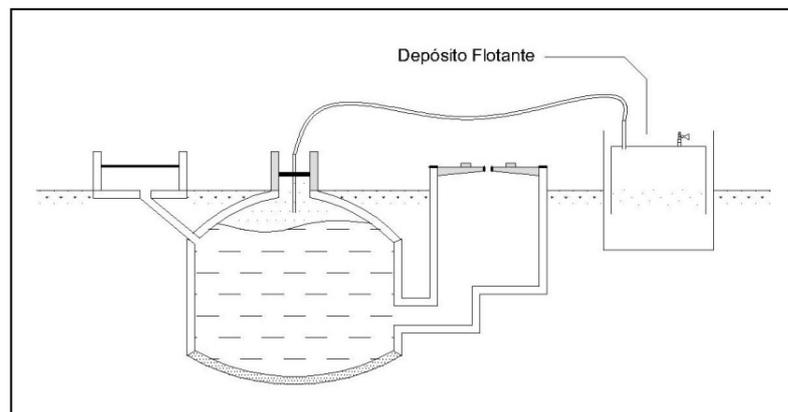


Figura 1.13.- Biodigestor con depósito flotante

Con gasómetro de caucho o material plástico tipo bolsa: es similar al biodigestor de depósito flotante, en este caso el almacenamiento de gas se realiza en una bolsa plástica de alta densidad o un depósito de caucho (como por ejemplo la cámara

neumática de una llanta de auto), la cual se va llenando a medida que se genera el biogás para su consiguiente utilización.

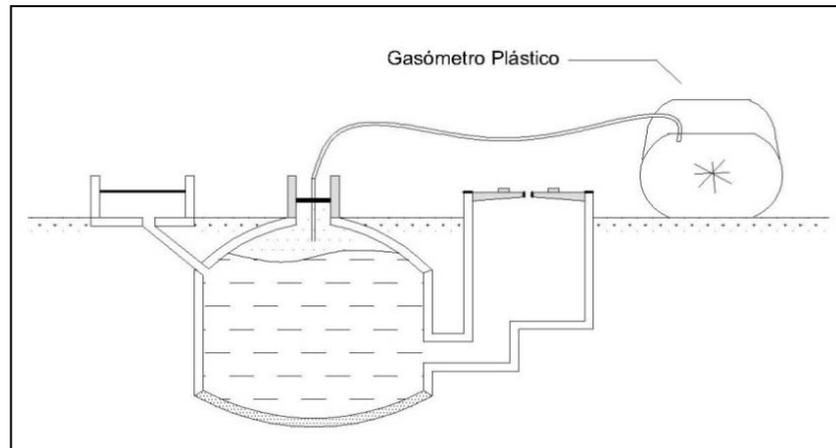


Figura 1.14.- Biodigestor con gasómetro plástico

1.3 Características y principio de funcionamiento.

A continuación se describe las características y los principios de funcionamiento.

- Entrada de la materia orgánica: conducto mediante el cual ingresa los desechos a fermentar, así como inóculos, agua y otros hasta el contenedor. Este debe sellarse perfectamente después de cumplida su función.
- Contenedor o digestor: depósito hermético e impermeable, construido de materiales que no sean reactivos con la humedad o con material orgánico. En el interior de este contenedor es en donde se produce la fermentación anaerobia.
- Gasómetro: depósito de almacenamiento en el cual es recolectado el biogás formado para su respectiva distribución.
- Salida de efluentes: conducto mediante el cual son retirados los subproductos después de realizada la fermentación.
- Termómetro y manómetro: aparatos con los cuales es posible conocer la temperatura y presión del interior del biodigestor, y comprobar su correcto funcionamiento.

- Sellos de hermetización: necesarios para conseguir un aislamiento entre el medio ambiente y el digester, así como impedir el escape del biogás generado.

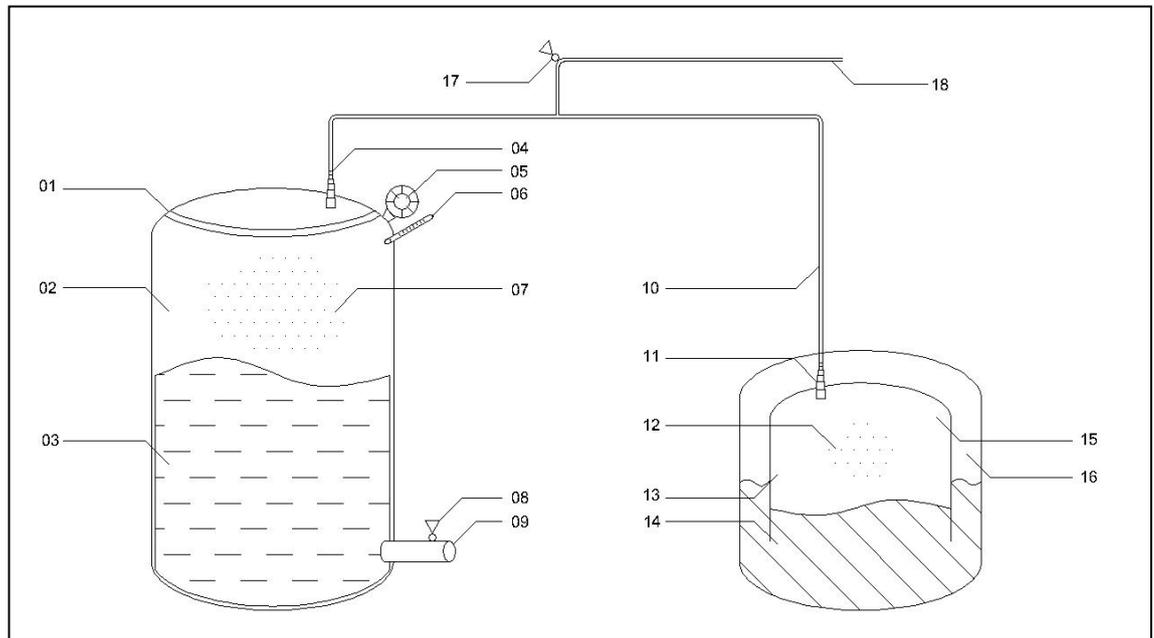


Figura 1.15.- Esquema del sistema biodigestor – gasómetro

De la figura 1.15.

- 01 Tapa hermética y entrada de materia orgánica
- 02 Cuerpo del biodigestor
- 03 Materia orgánica en fermentación
- 04 Salida del biogás generado
- 05 Manómetro
- 06 Termómetro
- 07 Biogás
- 08 Válvula o llave de paso
- 09 Toma para muestras y salida de subproductos
- 10 Tubería de paso del biogás hacia el gasómetro

- 11 Entrada del biogás al gasómetro
- 12 Biogás almacenado
- 13 Cuerpo del gasómetro
- 14 Sello de agua
- 15 Recipiente invertido contenedor
- 16 Espacio vacío
- 17 Llave reguladora de distribución de biogás
- 18 Red de distribución general de biogás

El principio básico de funcionamiento es el mismo que tienen todos los animales, descomponer los alimentos en compuestos más simples para su absorción mediante bacterias alojadas en el intestino con condiciones controladas de humedad, temperatura y pH.

La digestión de materia orgánica en un biodigestor es un proceso de descomposición anaeróbica, que consiste en su degradación sin la presencia de oxígeno. El proceso para la producción de metano (CH_4), denominada metanogénesis, dióxido de carbono y otros compuestos implica una serie de reacciones bioquímicas, donde participan gran variedad de microorganismos, los cuales a una parte del carbono lo oxidan a CO_2 y a otra la reducen en alto grado para formar metano, siendo ambos compuestos químicamente estables.

Prácticamente toda materia orgánica puede utilizarse para la fermentación. Para la obtención de biogás principalmente se emplean aguas residuales residenciales, de la industria liviana y alimentaria, desechos municipales y subproductos agrícolas (desechos vegetales y excretas animales). La composición química fundamental de estos recursos son polisacáridos, proteínas, grasas y pequeñas cantidades de metabolitos, casi todos insolubles en agua.

Estos compuestos son desdoblados fundamentalmente por bacterias que descomponen los materiales orgánicos, algunos de los cuales producen gas metano y otros no producen ningún gas, también se han encontrado en los

aislamientos protozoarios y hongos. La cooperación e interacción entre estos microorganismos es lo que produce la transformación y degradación de los diversos materiales, de allí que el conocimiento de la microbiología de la fermentación metanogénica sea la base fundamental para el diseño del equipo, la organización del proceso, la política tecnológica de la producción y el control de las condiciones técnica. (FAO, 1986).

CAPITULO 2

FERMENTACIÓN ANAEROBIA

2.1 Generalidades

El termino fermentación es muy conocido en el campo de la Bioquímica y de la microbiología, proviene del latín *fervere*, que en español significa hervir, el cual fue bautizado así por la similitud que presenta con el proceso de ebullición al desprender burbujeo durante el desarrollo del producto deseado, y se denomina un proceso Anaeróbico, ya que se lleva acabo solo en ausencia de oxígeno, que literalmente significa “sin aire”. Pero, ¿qué es una fermentación?

Una fermentación es la obtención o desarrollo de un metabolito o producto mediante la ruptura anaeróbica de la materia prima o sustrato orgánico (también denominado medio de cultivo), por la acción de un sistema enzimático o inculo (ya sea un microorganismo o una enzima), el cual modifica la estructura del medio en el transcurso del proceso mientras va en aumento su concentración o también llamada Biomasa, en otras palabras, es la obtención natural o controlada de productos por medio de la interacción entre un inculo y su entorno.

El Producto a obtener no necesariamente es un metabolito, en algunos casos se utiliza la fermentación para la producción de enzimas necesarias para otros procesos como por ejemplo, la producción de levaduras para utilizar como inculo en la producción de bebidas alcohólicas, en este caso lo que se hace es alimentar la biomasa y controlar las condiciones, mientras que para la producción de alcohol se alimenta a la biomasa para que mediante un proceso metabólico elabore Alcohol Eílico.

Todos estos procesos se ven afectados por factores tanto internos como externos, donde los internos están representados por la estructura genética del enzima o microorganismo, mientras que los externos son los parámetros del medio, como: concentración y composición del medio, temperatura, pH, agitación, etc. De los cuales dependerá el desarrollo apropiado o el fracaso de la fermentación.

También es de vital importancia conocer el tipo de inóculo, los factores externos se modifican dependiendo de las características del mismo; los nutrientes del medio, la temperatura, el pH y otros factores son intrínsecos para cada inóculo y varían de acuerdo con las necesidades, y de lo que se busque obtener en la fermentación.

Muchas son las aplicaciones de la fermentación anaeróbica y los microorganismos en el campo de la industria, así tenemos; En el campo de la Medicina cumple un papel importante para producción de medicamentos, en la industria de los alimentos es utilizada para la producción de bebidas, enzimas, saborizantes, productos lácteos, etc. Y una de las aplicaciones que últimamente ha tenido un gran impacto, tanto social como ecológicamente, es el caso de la obtención de fuentes de energía como el Biodiesel y Biogás, así como para el tratamiento de efluentes y desechos que da un gran beneficio para el medio ambiente y el cual es la base para el presente trabajo.

A continuación se muestra un esquema de la fermentación anaeróbica:

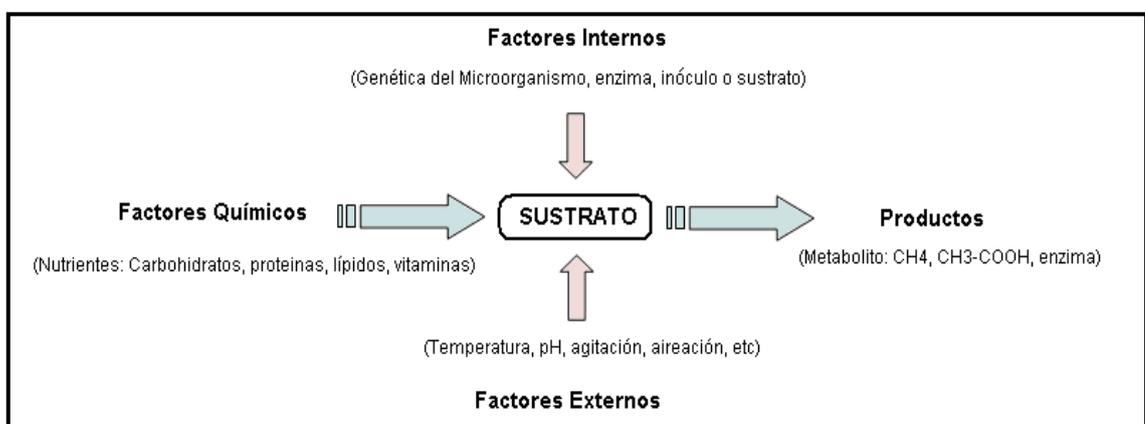


Figura 2.1.- Esquema del proceso de fermentación anaeróbica.

2.2 Fermentación anaeróbica: producción de biogás

La degradación de la materia orgánica es un proceso que se lleva a cabo de forma natural en nuestro entorno; pantanos, pozos sépticos, ríos, sedimentos marinos y estómago de los rumiantes son los mejores ejemplos. Esta fermentación o mejor llamada biodegradación, se da gracias a la acción de una serie de microorganismos aerobios, aerobios facultativos y anaerobios (Biomasa), los cuales son los encargados de desdoblar las macromoléculas de la materia orgánica como las proteínas, carbohidratos, y lípidos hasta obtener una mezcla de gases llamada biogás cuya composición es de 65% de metano (CH_4), 30% de dióxido de carbono (CO_2), 1% de ácido sulfúrico (HS), y pequeñas cantidades de nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y monóxido de carbono, todo esto en condiciones anaeróbicas.

El inóculo o biomasa que está presente en este proceso es muy diverso, se han dispuesto cuatro grupos de microorganismos principales los cuales están clasificados por cada etapa y función específica en la fermentación:

Tabla 2.1.- Cuadro de los microorganismos presentes en la fermentación

GRUPO I	GRUPO II	GRUPO III	GRUPO IV
<i>Microorganismos hidrolíticos</i>	<i>Microorganismos Acetogénicos</i>	<i>Microorganismos Homoacetogénicos</i>	<i>Microorganismos Metanogénicos</i>
Catalizan carbohidratos, lípidos y proteínas, son el menor % de la biomasa.	Productoras de hidrogeno, catabolizan ciertos ácidos grasos.	Catabolizan compuestos monocarbonados, o hidrolizan compuestos hacia la producción de ácido acético	Catabolizan Acetato para la producción de Metano (CH ₄).

En toda fermentación o digestión anaeróbica para la producción de biogás, es necesario que se cumplan cada una de las fases, ya que cada paso provee las condiciones y nutrientes para que el proceso no se estanque.

2.3 Etapas metabólicas involucradas en la producción de biogás

Considerando las diferentes actividades de los microorganismos presentes en la digestión, se ha clasificado al proceso en tres pasos fundamentales:

- Hidrólisis de macromoléculas y Acidogénesis.
- Fase acetogénica.
- Fase Metanogénica.

La fermentación o digestión comienza con el ingreso de los diferentes desechos orgánicos al reactor, existe una gran diversidad de materias orgánicas utilizadas para la producción de biogás; aguas residenciales, aguas residuales de la industria alimenticia, así como los desechos orgánicos producto de la elaboración de alimentos, desechos municipales y algunos subproductos agrícolas como residuos de cultivos y excrementos de animales. Todos estos desechos orgánicos sufren una

primera etapa de hidrólisis, las macromoléculas son reducidas a sus estructuras más simples para que puedan ser asimiladas por el segundo y tercer grupo de microorganismos, los cuales proveerán de metabolitos necesarios para la última fase, la misma que lleva el nombre de “*Metanogénica*”, debido a que en este último paso es en donde se da la producción de biogás por acción de los microorganismos metanogénicos.

Como se puede observar, la obtención de biogás es un proceso de acción conjunta de varios microorganismos y diferentes condiciones externas. A continuación se muestran un diagrama del proceso (figura 2.2) y paso seguido se estudiarán cada una de sus fases:

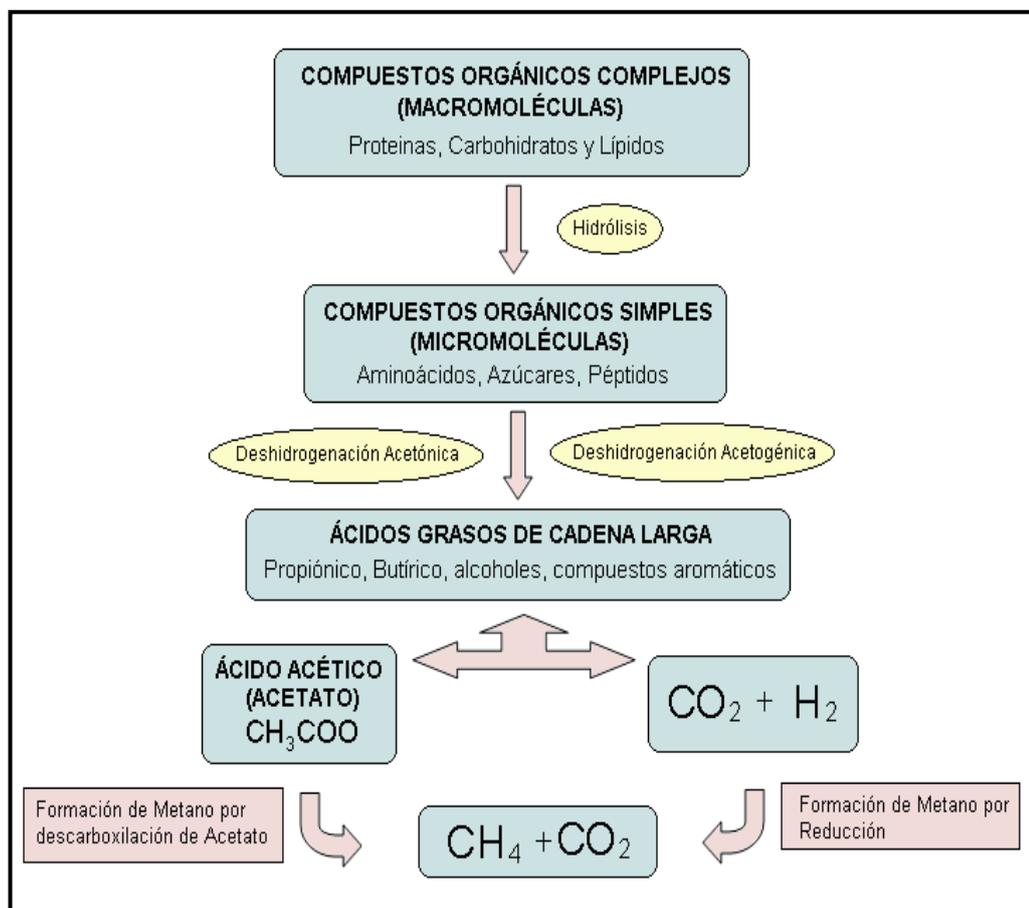


Figura Nº 2.2.- Etapas metabólicas involucradas en la producción de biogás,

2.3.1 Primera etapa: Hidrólisis de macromoléculas y acidogénesis

En esta primera fase la materia orgánica (Desechos orgánicos) se encuentra en un estado natural -la cual entrara en el digestor para comenzar la fermentación- los microorganismos propios de la materia comenzarán a desnaturalizar las macromoléculas en estructuras más fundamentales, por ejemplo: proteínas a aminoácidos y péptidos, carbohidratos a azúcares y lípidos a ácidos grasos.

La degradación comienza por las materias más simples de descomponer para los microorganismos, las grasas o lípidos son estructuras menos complejas que los carbohidratos y las proteínas por lo que la digestión comienza por las grasas, dando como resultado una gran producción de ácidos grasos volátiles, H_2 , CO_2 , y pequeñas cantidades de ácidos orgánicos y alcoholes.

Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos para luego ser convertidas en ácido acético, propiónico y butírico, mientras que los polisacáridos como la celulosa, hemicelulosa, pectina, etc. son hidrolizados ha monosacáridos que son sucesivamente fermentados a una variedad de productos finales a partir de ácido pirúvico.

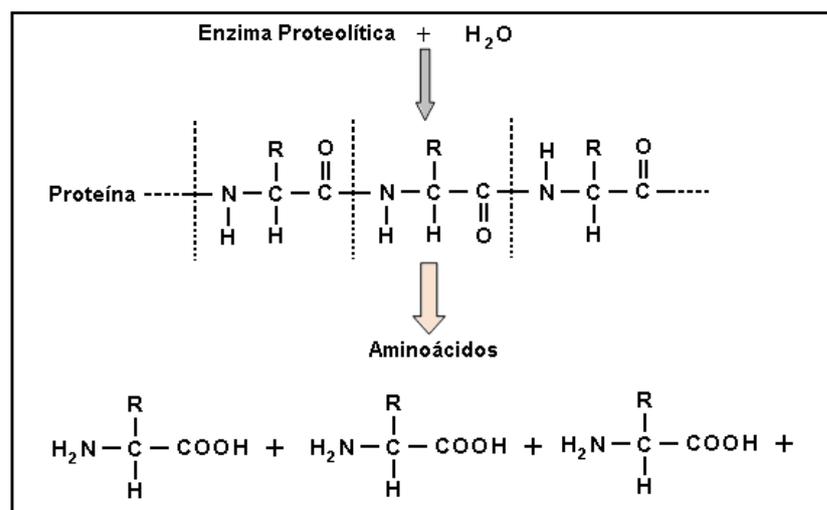


Figura 2.3.- Hidrólisis de una molécula de proteína
Fuente: KRAUS, Gabriele. TEGA, Ernesto. Bioenergie: aspetti chimici e microbiologici della fermentazione anaeróbica. 1984. Pg. 12.

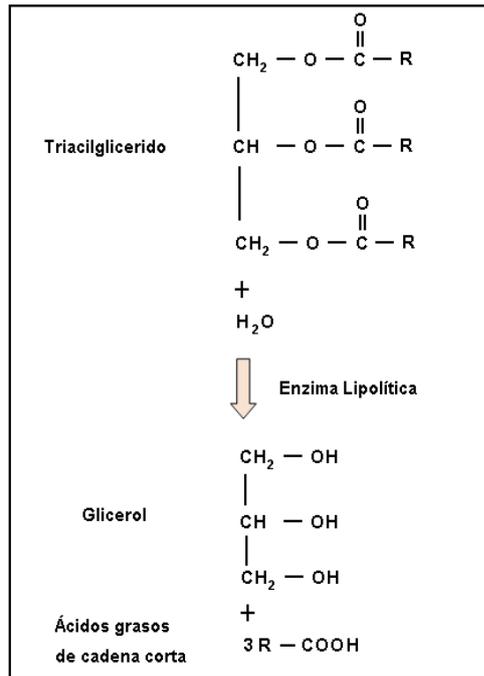


Figura 2.4.- Hidrólisis de una molécula de lípido.

Fuente: KRAUS, Gabriele. TEGA, Ernesto. Bioenergie: aspetti biochimici e microbiologici della fermentazione anaeróbica. 1984. Pg. 15.

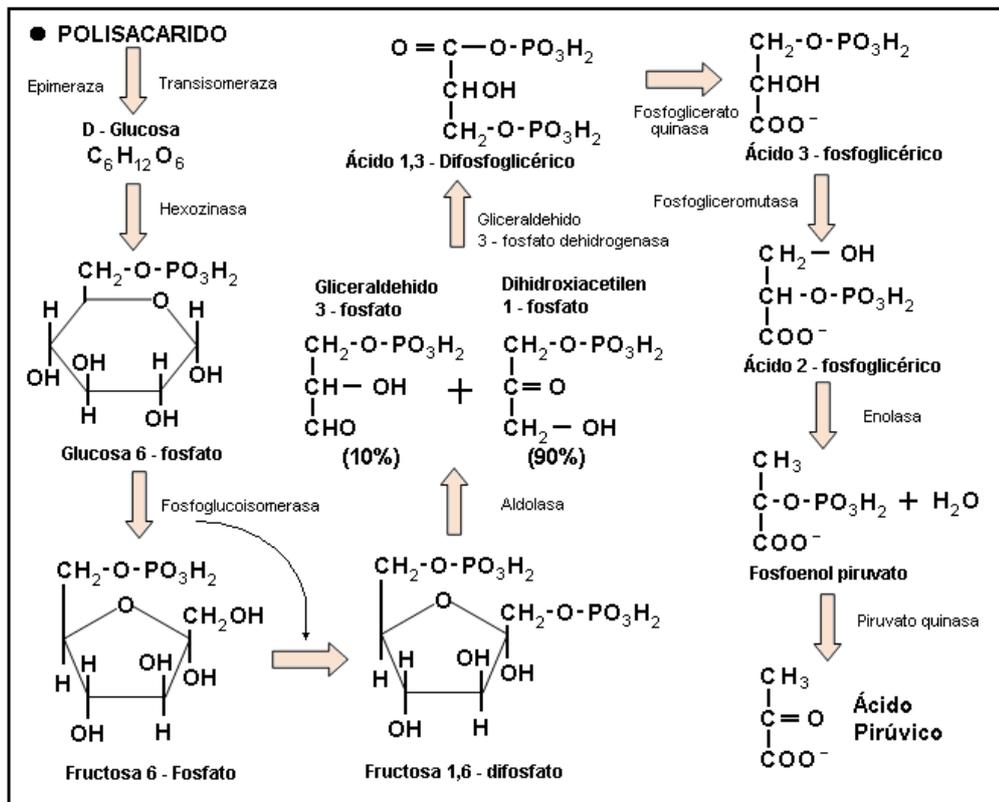


Figura 2.5.- Vía metabólica de la fermentación de la glucosa

Fuente: KRAUS, Gabriele. TEGA, Ernesto. Bioenergie: aspetti biochimici e microbiologici della fermentazione anaeróbica. 1984. Pgs. 17 y 18.

2.3.2 Segunda etapa: Fase acetogénica

Los diferentes productos obtenidos en la primera etapa (ácidos orgánicos, ácidos grasos, ácido pirúvico, H_2 , CO_2 , alcoholes, etc.) son el sustrato para la producción de ácido acético ($CH_3 - COOH$), CO_2 y H_2 , los cuales son fundamentales para la obtención de Metano (CH_4) y conformar el biogás.

La producción de ácido acético ($CH_3 - COOH$) o Acetogénesis + H_2 esenciales para la etapa posterior tienen dos puntos de partida; El primero que es la formación de ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono a partir de ácidos orgánicos, ácido pirúvico, ácidos grasos, compuestos aromáticos y alcoholes, se lleva a cabo por medio de un grupo de microorganismos denominados Acetogénicos, los cuales utilizan los metabolitos nombrados, mientras que el segundo grupo de microorganismos denominado Homoacéticos, es capaz de metabolizar compuestos de un solo átomo de carbono ($HCOOH$, H_2/CO_2) para la producción de ácido acético.

Existe una actividad sinérgica en esta fase, la formación del ácido acético se ve mejorada por el consumo de hidrogeno a cargo de los microorganismos homoacetogénicos y la formación del mismo al consumir componentes simples.

A continuación se presenta la tabla 2.2 de los principales metabolitos que se producen en la segunda etapa de la fermentación anaeróbica, fundamentales para producción de biogás.

Tabla 2.2.- Metabolitos obtenidos en la segunda etapa de fermentación

Sustrato	Tipo de fermentación	Metabolito obtenido
<p>Ácido Pirúvico</p> $\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{C} = \text{O} \\ \\ \text{COOH} \end{array}$	Fermentación Alcohólica	$\text{CH}_3 - \text{CH}_2\text{OH} + \text{CO}_2$ Alcohol Etílico
	Fermentación Láctica	$\text{CH}_3 - \text{CHOH} - \text{COOH}$ Ácido Láctico
	Fermentación ácido mixta	$\text{HCOOH} + \text{CO}_2 + \text{H}_2$ Ácido fórmico $\text{CH}_3 - \text{COOH}$ Ácido acético $\text{CH}_3 - \text{CHOH} - \text{COOH}$ Ácido Láctico $\text{CH}_3 - \text{CH}_2\text{OH}$ Alcohol Etílico $\text{COOH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{COOH}$ Ácido Succínico
	Fermentación Propiónica	$\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{COOH}$ Ácido propiónico $\text{CH}_3 - \text{COOH} + \text{CO}_2$ Ácido acético
	Fermentación Butírica	$\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{COOH}$ Ácido butírico $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{OH}$ Alcohol butílico $\text{CH}_3 - \text{CO} - \text{CH}_3$ Dimetil cetona $\text{CH}_3 - \text{CHOH} - \text{CH}_3$ Alcohol isopropílico $\text{CH}_3 - \text{COOH}$ Ácido acético $\text{CO}_2 + \text{H}_2$
	Fermentación 2,3 – Butilenglicólica	$\text{CH}_3 - \text{CHOH} - \text{CHOH} - \text{CH}_3$ 2,3 butilenglicol CO_2
Aminoácidos	Alanina	$\text{CH}_3 - \text{COOH}$ Ácido acético
	Glicina	$\text{CH}_3 - \text{COOH}$ Ácido acético
	Treonina	$\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{COOH}$ Ácido propiónico
Lípidos	Triacilglicérido	$\text{CH}_2\text{OH} - \text{CHOH} - \text{CH}_2\text{OH}$ Glicerol $3\text{R} - \text{COOH}$ ácidos grasos de cadena corta

Fuente: KRAUS, Gabriele. TEGA, Ernesto. Bioenergie: aspetti biochimici e microbiologici della fermentazione anaeróbica. 1984. Pg. 19.

2.3.3 Tercera etapa: Fase metanogénica

La última etapa en la producción de biogás es la denominada fase “metanogénica”, la cual estudia la transformación de los compuestos en Metano (CH₄) por la acción de un grupo de microorganismos llamados “*metanogénicos*”, los cuales consumen el sustrato provisto en las fases anteriores. (Este proceso será mejor estudiado en 2.5)

2.4 Microorganismos de la hidrólisis, acidogénesis y Acetogénesis

Son un grupo de microorganismos responsables de la degradación de las macromoléculas en estructuras más sencillas, dentro del cual se encuentran un número variado de especies (bacterias, mohos y protozoo) tanto aerobios, anaerobios y facultativos, clasificados de la siguiente manera:

- Bacterias fermentativas.
- Bacterias acetogénicas productoras de Hidrógeno (H₂).
- Bacterias homoacéticas.

2.4.1 Bacterias fermentativas

Son el primer grupo de microorganismos que entran en acción en el proceso de biodigestión, encargados de la Hidrólisis y Acidogénesis del sustrato orgánico o medio de cultivo, los cuales cumplen dos funciones fundamentales: Las exoenzimas producidas por las bacterias desdoblan polímeros, proteínas y lípidos en pequeñas moléculas para ser transportadas al interior de la célula y como paso final ser convertidos en metabolitos.

Entre los principales microorganismos presentes en esta etapa podemos citar los siguientes: *Bacterium*, *Lactobacillus*, *Clostridium*, *Bifidobacterium*, *Eubacterium* y

Butyrivibrio, los cuales necesitan de ciertas condiciones para su mejor crecimiento: CO₂ y ácidos orgánicos como fuente de carbono (C), amonio como fuente de nitrógeno (N), cisteína o sulfuro como fuente de azufre (S), vitamina B, hemina, menodione y Sales minerales especialmente de sodio (Na), los cambios de pH y temperatura no desestabilizan su metabolismo, debido a esto su crecimiento es rápido y son organismos facultativos, ya que soportan pequeñas cantidades de oxígeno.

2.4.2 Bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno (H₂)

Este segundo grupo de microorganismos son los encargados de catabolizar los productos obtenidos en la degradación de las macromoléculas y transformarlos en ácido acético (CH₃ – COOH) e hidrógeno (H₂), existe una asociación sintrópica¹ entre bacterias acetogénicas productoras de H₂ y bacterias consumidoras de H₂ regulando el nivel de hidrógeno (H₂) en el ambiente. Dentro de este grupo se encuentran dos principales microorganismos; *Syntrophobacter Wolinii* y *Desulfovibrio*, los cuales actúan como emisor y receptor de iones hidrógeno (H₂) respectivamente.

2.4.3 Bacterias homoacéticas

Este tercer grupo de microorganismos cumplen la misma función que las bacterias acetogénicas, pero con diferente sustrato, son capaces de metabolizar compuestos de un solo átomo de carbono (HCOOH, H₂/CO₂), su principal característica es la de consumir Dióxido de carbono (CO₂) e Hidrógeno (H₂) para producir ácido acético (CH₃ – COOH).

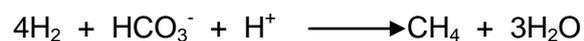
En todo el proceso de fermentación anaeróbica para la producción de Biogás la mayoría de microorganismos o biomasa que entran en acción son no metagénicos, y tienen una gran importancia en el desarrollo del proceso anaeróbico, ya que las bacterias (Arqueas metanogénicas) productoras de biogás, no pueden aprovechar

directamente los componentes orgánicos a menos que hayan sido degradados y convertidos en componentes más sencillos y de menor peso molecular, además estos microorganismos al ser facultativos, consumen el oxígeno existente en el medio digestor y crean las condiciones anaeróbicas necesarias para la fase de metanogénesis.

2.5 Metanogénesis

El último proceso a estudiar en la conversión anaeróbica de la materia orgánica se fundamenta en la producción de metano (CH₄) por la acción de microorganismos, las dos primeras etapas proveen de los metabolitos necesarios para que las denominadas “Arqueas metanogénicas” consuman los mismos y produzcan el denominado Biogás (CH₄ + CO₂).

La transformación final cumplida en esta etapa tiene como principal sustrato el ácido acético o acetato (CH₃ – COOH), dióxido de carbono (CO₂) e Hidrógeno (H₂), junto a otros ácidos orgánicos de cadena corta, así como, condiciones de anaerobiosis estrictas y condiciones externas estables (Temperatura, presión, etc.). La primera vía por la cual los *arqueas metanogénicas* producen metano es mediante la descarboxilación de ácido acético y otros ácidos orgánicos de cadena corta, de la cual proviene la mayor producción de metano (70%) en un medio anaeróbico (Smith, 1980), mientras que el otro 30% de producción de metano se debe a la reducción del dióxido de carbono (CO₂) e hidrógeno, debido a la capacidad de cierto tipo de arqueas capaces de metabolizar compuestos de un solo átomo de carbono, como se expresa en la siguiente reacción.

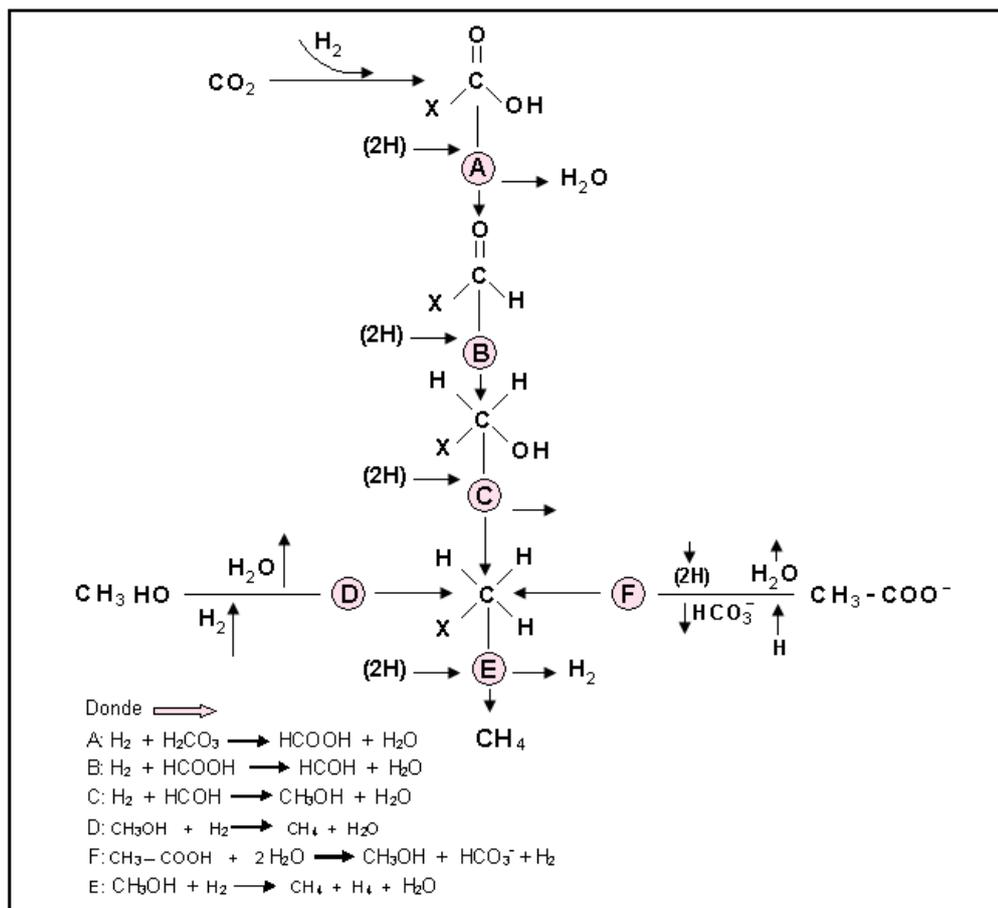


A continuación se presenta las principales reacciones de metanización y los sustratos necesarios (Tabla 2.3), así como las principales vías o esquema de producción de metano en la figura 2.6, las cuales se llevan a cabo por la acción de las arqueas metanogénicas por sus dos vías, tanto por descarboxilación del ácido acético, como por la reducción del dióxido de carbono.

Tabla 2.3.- Principales reacciones de metanización con diferentes sustratos

Sustrato: Ácido acético	$\text{CH}_3 - \text{COOH} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^-$
Sustrato: Metanol	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2 \longrightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ $4\text{CH}_3\text{OH} + \text{CH}_3 - \text{COOH} \longrightarrow 4 \text{CH}_4 + 2 \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ $4\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 3 \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+$
Sustrato: Amina	$4 \text{CH}_3\text{NH}_3^+ + 3 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 3 \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + 4\text{NH}_4^+ + \text{H}^+$ $2(\text{CH}_3)_2\text{NH}_2^+ + 3 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 3 \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + 2\text{NH}_4^+ + \text{H}^+$ $4(\text{CH}_3)_3\text{NH}^+ + 9 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 9 \text{CH}_4 + 3 \text{HCO}_3^- + 4\text{NH}_4^+ + 3\text{H}^+$
Sustrato: Anhídrido Carbónico	$\text{HCO}_3^- + 4 \text{H}_2 + \text{H}^+ \longrightarrow \text{CH}_4 + 3 \text{H}_2\text{O}$

Fuente: KRAUS, Gabriele. TEGA, Ernesto. Bioenergie: aspetti biochimici e microbiologici della fermentazione anaeróbica. 1984. Pg. 28

**Figura 2.6.-** Esquema bioquímico de la metanogénesis

Fuente: KRAUS, Gabriele. TEGA, Ernesto. Bioenergie: aspetti biochimici e microbiologici della fermentazione anaeróbica. 1984. Pg. 29.

En esta última etapa los cambios de los factores externos como; la temperatura, el pH, medio anaeróbico, nutrientes, etc. Son determinantes, cualquier cambio puede ser limitante o inhibidor del proceso de fermentación y por consiguiente reducir o eliminar la producción de biogás.

2.6 Microorganismos responsables de la metanogénesis

El último grupo de microorganismos que entran en acción en la producción de biogás son las denominadas bacterias metanogénicas, son los organismos más sensibles al oxígeno sobre la Tierra. Como estas criaturas arcaicas carecen de citocromos y la enzima catalasa permite el entrada de hidrogeno y el oxígeno que ingresa a la célula, provoca la acumulación del citotóxico peróxido de hidrógeno y la destrucción de las estructuras celulares.

Las bacterias metanogénicas, junto con las halobacterias y los microorganismos termófilos reductores de sulfuro conforman el filum "*Archaea*" (formalmente *Archaeobacteria*). Su estructura y el metabolismo son muy diferentes al de las bacterias ordinarias (formalmente *Eubacteria*), y se encuentran generalmente en medios extremos, donde las condiciones se asemejan a los primeros periodos de nuestro planeta, cuando el oxígeno era escaso. (Rennenberg, 2006)

Las bacterias metanogénicas son anaerobias obligadas, sólo algunas conservan su viabilidad después de ser expuestas al oxígeno, comúnmente tienen dos rangos de temperatura: mesofílicas de 15 a 40°C y termofílicas de 55 a 65°C, el pH ideal para producir metano (CH₄) es de 6,8 a 7,2, pero puede variar entre especies. Sus principales fuentes como nutrientes son: Fuente de nitrógeno (N) y azufre (S); Sulfuro, amonio y cisteína, como fuente de carbono (C); Compuestos orgánicos o específicos, acetato, CO₂ y formato. Cierta tipo de arqueas utilizan el dióxido y monóxido de carbono (CO₂ y CO), su crecimiento se estimula con Vitamina B, cisteína y la mayoría utilizan dióxido de carbono (CO₂) e hidrogeno (H₂).

2.6.1 Arqueas metanogénicas

Arqueas estrictamente anaeróbicas, quimiorganotróficas o quimioheterotróficas produciendo metano como producto del metabolismo catabólico. Las metanogénicas pueden dividirse en tres subgrupos taxonómicos:

- **Orden:** *Arquea*
- **Familia:** *Metanogénica*

2.6.1.1 Subgrupo 1

Forma bacilar o cocácea, Catabolizan $H_2 + CO_2$, formiato o $H_2 +$ metanol. La pared celular contiene pseudomureína.

- **Géneros:**
 - *Methanobacterium*: Bacilos curvados, no esporulados, inmóviles y Gram variable. Temperatura óptima de crecimiento 37-45°C para especies mesófilas y 55°C o más para termófilas. Pueden encontrarse en suelos pantanosos, sedimentos u otros ambientes anóxicos.
 - *M. formicum*: especie tipo, habita en sedimentos acuáticos, rumen de vacunos o endosimbiontes en protozoos.
 - *Methanobrevibacter*: Formas de bacilos ovoides, bacilos cortos o cocos. Gram positivos, no forman esporas. Pared celular de pseudomureína, inmóvil. Pueden encontrarse en el tracto intestinal, digestores anaeróbicos u otros ambientes anóxicos.
 - *M. ruminantium*: especie tipo *Methanosphaera*: Cocos irregulares, Gram positivos, no forman endosporas, inmóviles.
 - *M. stadtmanae*: especie tipo *Methanothermus*: Bacilos ligeramente curvados, Gram positivos, no formadores de endosporas, pueden ser móviles. Temperatura óptima de crecimiento entre 83 - 88°C. Pueden encontrarse en campos termales sulfatados.

2.6.1.2 Subgrupo 2

Cocos, bacilos, espirales, crecen en $H_2 + CO_2$, formiato, o alcoholes + CO_2 , no poseen pseudomureína.

- **Géneros:**
 - Methanococcus: Cocos irregulares, Gram negativos, no formadores de endosporas. Mesófilos, termófilos o extremadamente termofílicos. Pueden encontrarse en marismas anóxicas o estuarios.
 - M. vannielli: especie tipo. Methanospirillum: Bacilos simétricamente curvados, formando una a -hélice, pueden agruparse formando cadenas de varios cientos de micrómetros. Células Gram negativas, no formadoras de esporas, móviles por flagelo polar. Temperatura óptima de crecimiento entre 35-40 °C. Pueden encontrarse en el rumen de bovinos y en digestores anaeróbicos.

2.6.1.3 Subgrupo 3

Forma de cocos, pseudosarcina o bacilos Gram negativos, inmóviles.

- **Géneros:**
 - Methanohalophilus: Cocos extremadamente irregulares, Gram negativos no formadores de endosporas, inmóviles. Óptima concentración de NaCl es de 0.5-2 moles. Pueden encontrarse en lagos salinos naturales o artificiales o aguas salinas profundas.
 - M. mahii: especie tipo. Methanosarcina: Cuerpos esféricos irregulares, solos o en típicos agregados celulares. Gram variables, no forman endosporas, móviles. Temperatura óptima 30-40°C para mesófilas y 50-55°C para termófilas. Pueden encontrarse en sedimentos marinos anóxicos, sedimentos de lagos o digestores anaeróbicos. (Muñoz, 2003)

2.7 Factores y condiciones

Son numerosos los factores y las condiciones que tienen influencia sobre el proceso de fermentación metanogénica, entre ellos tenemos:

2.7.1 Oxígeno (O₂)

Uno de los factores más importantes en una fermentación anaeróbica es la cantidad de oxígeno existente en el digestor, al comenzar un proceso de fermentación existirá cierta cantidad del mismo que servirá para las funciones metabólicas del primer grupo de microorganismos que son facultativos, los cuales se encargaran de consumir el oxígeno y dar las condiciones completas de anaerobiosis para las siguientes fases.

La condición de anaerobiosis -*Sin oxígeno*- tendrá que ser estricta para las fases de acetogénesis y sobre todo para metanización, las bacterias metanogénicas son estrictamente anaeróbicas, la existencia de oxígeno será limitante para producción de metano, debido a que este grupo de microorganismos que entran en acción en la producción de biogás son los organismos más sensibles al oxígeno sobre la Tierra, los cuales carecen de citocromos, la enzima catalasa permite la entrada de hidrógeno y el oxígeno a la célula, provoca la acumulación del citotóxico peróxido de hidrógeno y la destrucción de las estructuras celulares o la limitación de la misma, por lo que se vería estancada o eliminada la producción de metano.

2.7.1.1 Demanda Biológica de oxígeno (DBO)

Se denomina así a la cantidad de oxígeno necesaria para la degradación de materia orgánica por medio de la vía biológica, cierto tipo de microorganismos o microflora utilizan el oxígeno para metabolizar las macromoléculas.

2.7.1.2 Demanda química de oxígeno (DQO)

Cierto tipo de microorganismos utilizan el oxígeno como parte de su sustrato para metabolizar compuestos, por esta razón existe la demanda química de oxígeno que es aprovechada por los primeros microorganismos para la degradación de la materia orgánica.

Debido a la DBO y la DQO, la producción de Biogás se convierte en un proceso mixto, los primeros pasos de este proceso utilizan cierta cantidad de oxígeno que deberá ser necesariamente consumido para una mejor degradación de la materia prima inicial y crear la condición de anaerobiosis para los procesos siguientes.

2.7.2 Temperatura

La temperatura es un factor muy importante en la fermentación influenciando directamente sobre el tiempo de la digestión, la velocidad de las reacciones químicas y bioquímicas se incrementa normalmente cuando se eleva la temperatura, pero, temperaturas muy altas pueden causar una declinación en el ritmo metabólico del proceso, debido a la degradación de las enzimas que son esenciales para la vida celular. Los microorganismos tienen un crecimiento y ritmo metabólico óptimos dentro de un rango de temperatura muy bien definido, y que es específico para cada especie bacteriana.

Las bacterias metanogénicas son más sensibles a los cambios de temperatura que los otros microorganismos del digestor, esto es debido a que la velocidad de crecimiento de los otros grupos bacterianos es mayor que la de las metanogénicas, todos los microorganismos presentes en el biodigestor pueden resistir cambios variables de temperatura hasta un lapso de dos horas aproximadamente, y pueden retornar rápidamente a los ritmos normales de producción de metabolitos cuando la temperatura se restablece. Sin embargo, cuando la temperatura cae numerosas

veces o por un tiempo prolongado, esto puede conducir a un desbalance en la proporción de los microorganismos (Gunnerson y Stuckey 1986).

Existen tres rangos de temperaturas de producción de biogás que se han estudiado; el primero denominado “digestión sicrófila” que tiene un rango de temperaturas entre los 10°C a los 25°C tiene un proceso de fermentación demasiado largo, los procesos de digestión se ven reducidos debido a las temperaturas bajas y por consiguiente el incremento de biomasa es insignificante, conjuntamente con los cambios constantes de pH y a la limitada existencia de inóculos sicrófilos. El segundo rango denominado “digestión Mesófila” presenta temperaturas entre los 20°C a los 45°C con mejores resultados de fermentación, debido a que la mayor parte de los microorganismos presentes en la biodigestión tienen como temperatura óptima los 37°C, y por último tenemos la digestión “Termófila” con temperaturas entre los 35°C a los 55°C que incrementan al doble la producción de biogás y reducen los tiempos de producción.

Existe un limitante en la fermentación termofílica, el incremento de temperatura puede llegar a ser fatal para el proceso de metanización por el cambio drástico de temperatura, por esto es recomendable trabajar a temperaturas medias como la de 37°C que es la óptima para la mayoría de microflora presente en el biodigestor.

2.7.3 Potencial hidronio (pH)

Otro de los factores limitantes en el proceso de digestión metanogénica es el potencial hidronio o más conocido como pH, el cual tiene un rango de valores óptimo entre 6.6 a 7.6 (Yongfu, 1989). Los sustratos muy ácidos -menor a 6- así como los muy alcalinos -mayores a 8- sufren de producción limitada o estancamiento de producción de metabolitos, por la inhibición de la biomasa presente en el medio.

Como se pudo ver en el estudio de las etapas de la fermentación, la acidogénesis y acetogénesis son fundamentales en el proceso, pero, los ácidos grasos de cadena corta (AGCC) que se producen durante este proceso reducen el pH lo cual podría encadenar un problema, debido a que si las bacterias metanogénicas no pueden convertir los AGCC tan rápidamente como son formados por las bacterias acidogénicas y acetogénicas, los AGCC se acumularán y causarán un descenso en el pH del medio. Sin embargo, el equilibrio $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$ en el digestor ejerce una resistencia sustancial a los cambios de pH.

El principal método que se utiliza para corregir el pH involucra la adición de sustancias tamponadoras o buffer para elevar el pH sin cambiar el ritmo de carga del digestor, ya que otro método utilizado para corregir el pH es variar el ritmo de carga y permitir durante cierto tiempo que la población metanogénica reduzca la concentración ácida y que entonces el pH se eleve a un valor razonable, lo cual hace más lenta la actividad bacteriana y por lo tanto, también se reduce la formación de AGCC y el estancamiento del proceso. Una ventaja de la adición de tampones es que el pH puede rectificarse más rápidamente, para esto se suele utilizar la cal o el carbonato de sodio (CO_3Na).

Tabla 2.4.- Límites de potencial hidronio (pH)

Valor pH	Característica
7.2	Óptimo
Menor de 6.2	Retardo por ácidos
Mayor a 7.6	Retardo por amonios

Fuente: Infantes, Diseño de biodigestores. <http://www.ergomix.com>.

2.7.4 Relación carbono/nitrógeno (C/N)

Los principales nutrientes para la producción de biogás se encuentran expresados como la relación carbono/nitrógeno (C/N) presentes en el sustrato o medio de cultivo, siendo la esencial fuente de energía el carbono orgánico, así como en pequeñas cantidades el nitrógeno y el fósforo.

Esta relación está representada por el número resultante de la división entre la cantidad de Carbono (C) y la cantidad de Nitrógeno (N) que tiene una materia prima, donde el Carbono sirve de fuente de energía para los microorganismos presentes en el inóculo, y el nitrógeno sirve de fuente para formar la estructura de nuevas células, las concentraciones de estos dos elementos deben encontrarse en proporciones adecuadas debido a que; El exceso de Nitrógeno en un sustrato crea una demasía de células, las cuales consumirán aceleradamente el carbono y se agotará, creando así un medio competitivo y por consiguiente la paralización del proceso. Mientras que, el exceso de carbono acelerará el consumo del nitrógeno, reducción del nivel de crecimiento de biomasa y que el proceso marche con lentitud.

Teóricamente las bacterias consumen treinta veces más rápido el carbono que el nitrógeno, por lo que dicha relación óptima sería de 30/1, sin embargo, estudios han demostrado que la relación óptima es de 20 a 30 de carbono y 1 de nitrógeno (20-30/1).

Tabla 2.5.- Relación carbono/nitrógeno (C/N)

SUSTRATO	Contenido de C en los sustratos por peso (%)	Contenido de N en los sustratos por peso (%)	RELACIÓN C/N
Orina			0.8/1
Excreta de vacuno	7.3	0.29	10 – 20/1
Excreta de Porcino	7.8	0.60	9 – 13/1
Excreta de Gallina	7.5	0.5	5 – 8/1
Excreta de caprino / ovino	16	0.55	30/1
Excreta de Humanos	6.8	0.85	8/1
Paja de cereales	42	0.64	80 – 140/1
Paja de maíz	46	0.53	30 – 65/1
Gras fresco	40	0.75	12/1
Desperdicios de verduras	21	0.60	35/1

Fuente: Infantes, Diseño de biodigestores. <http://www.ergomix.com>.

2.7.5 Tiempo de retención

Un proceso de fermentación puede llevarse a cabo en pocos días así como también puede tomar varios años, todo depende de las condiciones con las que el sustrato se encuentre, la temperatura es uno de los factores primordiales para que el tiempo de retención de la fermentación sea corto, temperaturas bajas acrecentarán el tiempo de producción, mientras que las temperaturas altas reducirán el tiempo y la producción de gas.

Si un sustrato cuenta con las mejores condiciones de pH, anaerobiosis, relación C/N, homogenización, etc. Es decir, sin obstáculos para su proceso, el tiempo de retención estará en relación solamente de la temperatura, en siguiente cuadro se exponen los principales tiempos de permanencia:

Tabla 2.6.- Rangos de temperatura y el tiempo de retención

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de retención
Sicrofílica	4-10 °C	15-18°C	25-30°C	Arriba de 100 días
Mesofílica	15-20 °C	28-33°C	35-45°C	30-60 días
Termofílica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

Fuente: Infantes, Diseño de biodigestores. <http://www.ergomix.com>.

2.7.6 Homogenización

En un proceso de fermentación la homogenización es de fundamental ayuda para mantener una temperatura uniforme, así como permitir un mejor contacto del sustrato con el inóculo. Uno de los principales problemas que presentan los sistemas de fermentación estáticos es el estancamiento de los metabolitos producidos y formación de toxicidad, los sólidos volátiles que se producen durante el proceso pueden quedar encerados en el medio y no permitir el crecimiento de la biomasa.

CAPITULO 3

DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1 Generalidades

El mejoramiento de los procesos, reducción de tiempos y desperdicios, mayor calidad de materias, etc., se vuelven un punto importante para el desarrollo y competitividad de la industria, razón por la cual, se torna una práctica común hacer experimentos o pruebas con la intención de modificar o hacer algunos cambios a un proceso determinado tanto en los materiales o condiciones de producción para medir los resultados obtenidos, y así detectar, resolver o minimizar los problemas que puedan existir en un campo de producción.

Sin embargo, la mayoría de estas experimentaciones se basan en pruebas que se van haciendo durante la marcha de la producción a una especie de prueba – error sin obtener mayores resultados, por lo que la aplicación del diseño experimental es fundamental, el cual consiste en determinar cuáles pruebas y cómo es que se deben realizar para obtener resultados que al analizarlos estadísticamente se obtengan conclusiones y decisiones que deriven en mejoras del desempeño del proceso (Pulido, Salazar 2004).

Por otro lado el diseño experimental es fundamental para el campo de la investigación científica, se basa en el mismo principio de experimentación y análisis de resultados planteados en una hipótesis para generar conocimiento.

Son varios los tipos de diseños de experimentación que se aplican en la actualidad para estudiar la gran diversidad de problemas o situaciones que ocurren en la práctica, debido a esto se ve de indispensable necesidad conocer cual es el problema o la hipótesis y sus variables, así también conocer cuáles son los principales pasos para plantear correctamente el diseño a utilizar de manera que se obtenga la máxima información al mínimo consumo de tiempo y costo. Ha el estudio completo de la problemática y sus variables de dependencia, así como el arreglo de experimentación con sus repeticiones se le denomina “*matriz de diseño*”.

3.2 Partes de un diseño experimental

El diseño experimental, como ya se expuso con anterioridad, permite optimizar la información o el conocimiento generado en un proceso, por esta razón es indispensable conocer cuáles son sus partes y su importancia

3.2.1 Experimento

Se denomina así al procedimiento de controlar las condiciones de operación de un sistema o proceso con el propósito de obtener información sobre el efecto que causa sobre una o varias respuestas, el cual permite conocer más acerca de dicho sistema.

3.2.2 Matriz de diseño

Consiste en plantear un conjunto de pruebas experimentales en un orden lógico dependiente del número de variables del estudio, de tal manera que los datos generados puedan analizarse estadísticamente para obtener conclusiones que sean válidas y objetivas para el proceso.

3.2.3 Unidad experimental

La unidad experimental es la muestra de artículos que es necesario producir en una condición de operación del proceso para obtener, a partir de ellos, una medición o dato representativo de la situación actual del proceso (Pulido, Salazar 2004), en otras palabras, conocer el producto que se obtiene del sistema o proceso en estudio para de aquí partir con las posibles correcciones. La unidad experimental puede ser tomada luego de la aplicación del diseño para las medir la efectividad y mejoras del proceso.

3.2.4 Variables de respuesta

Es la respuesta o variable de salida cuyo valor interesa mejorar, por lo general representa algún valor de la calidad del producto final, por ejemplo; la variación de presión, la dureza de un producto, color, textura, acidez, etc., la conjetura del diseño se encentra en que puede utilizar el mismo proceso o buscar uno nuevo para mejorar la respuesta.

3.2.5 Factores controlables

Son las variables de entrada de un proceso que comúnmente se pueden fijar en un nivel de operación, las cuales son los valores que normalmente se utilizan para controlar el proceso (temperatura, acidez, presión, velocidad de reacción, tiempo de permanencia, etc.), pero que pueden ser manipuladas para el estudio de su efecto sobre la respuesta o producto final. A estos factores también se les conoce con el nombre de variables de entrada, condiciones de proceso y variables de diseño.

3.2.6 Factores no controlables

Como su nombre lo define, son variables que no se controlan en un manejo normal del proceso (Luz, humedad, acidez, partículas, ruido, etc.), pero que pueden ser estudiadas para su control y mejora.

Dentro de los factores de un sistema que influyen la respuesta final están estos dos tipos de variables, sin embargo, los factores ha estudio son solo las variables que mediante la experimentación se definan como importantes para el resultado.

3.2.7 Niveles

Son los valores que se les asigna a cada uno de los factores de estudio, comúnmente una variable se encuentra a dos niveles de experimentación y un nivel medio u óptimo de actividad, por ejemplo; un microorganismo tiene una temperatura óptima de crecimiento cercana a la corporal (37°C), sin embargo, para el mejoramiento de su crecimiento se puede estudiar la respuesta del mismo al cambio de temperatura; una más alta (50°C) y una más baja (20°C).

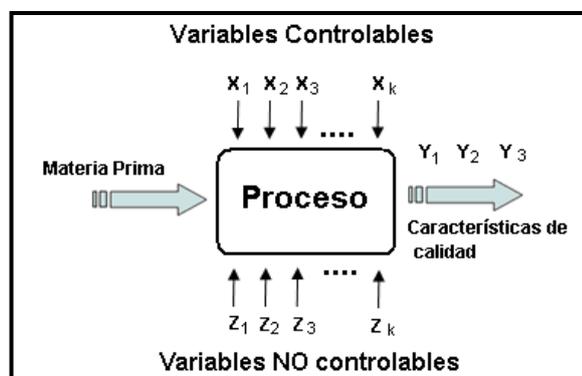


Figura 3.1.- Factores y variables en un diseño.

Fuente: PULIDO, H. DE LA VARA, P. Análisis y diseño de experimentos. 2004. Pg.13.

3.3 Etapas en el diseño experimental

El éxito de la aplicación del diseño experimental a un proceso o sistema se encuentra en obtener la información necesaria del mismo (problema, factores y respuesta), de aquí que la planeación por etapas de su aplicación es fundamental para su correcto y eficaz funcionamiento, a continuación se presenta un esquema de sus etapas fundamentales:

Tabla 3.1.- Esquema de implementación de un diseño experimental

Etapas	ACTIVIDAD
Uno	<i>Localizar el problema:</i> detectar la causa (pérdidas o mejoras).
Dos	<i>Factores a estudiar:</i> determinar la influencia interna y externa del sistema.
Tres	<i>Determinar la variable de respuesta:</i> objetivo del experimento.
Cuatro	<i>Selección del diseño experimental:</i> de acuerdo a los factores y el objetivo.
Cinco	<i>Planear y organizar el trabajo experimental:</i> con base en el diseño elegido.
Seis	<i>Desarrollo del proceso:</i> implementación experimental.
Siete	<i>Análisis:</i> determinar la técnica estadística para interpretar los resultados.
Ocho	<i>Interpretación:</i> análisis detallado del experimento y sus resultados.
Nueve	<i>Conclusiones finales:</i> deducción de las medidas a tomar.

3.4 Clasificación de los diseños experimentales

Son muchos los tipos de diseños que han planteado para resolver la gran diversidad de problemas que se pueden dar en la práctica, sin embargo la elección se resume al tipo de información que se contenga y al resultado que se espera obtener. Los principales aspectos a considerar el momento de seleccionar un diseño experimental son los siguientes; El objetivo del experimento, el número de variables, los niveles que se prueban para cada variable, el resultado ha obtener (variables – respuesta), el costo, tiempo y precisión de resultados.

La figura 3.2 muestra la clasificación de los diseños de acuerdo al objetivo que se persigue en la investigación.

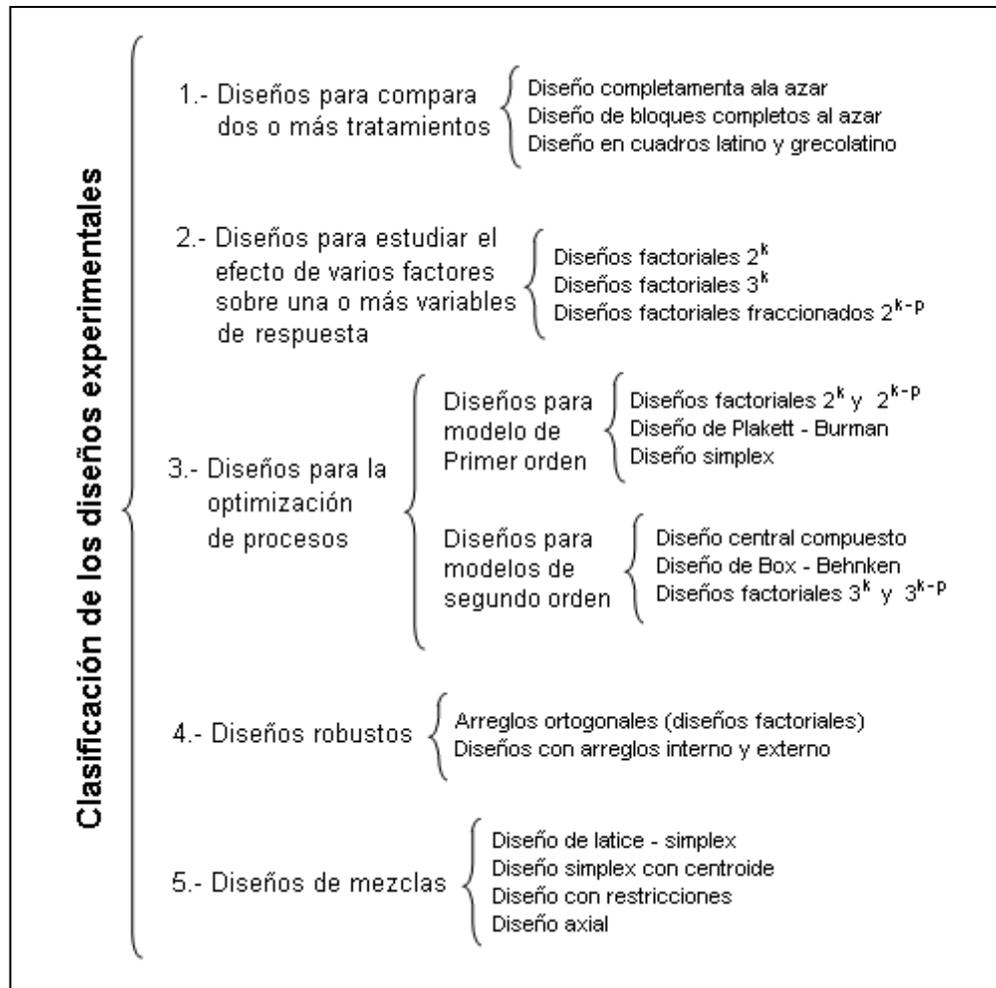


Figura 3.2.- Clasificación de los diseños experimentales
Fuente: PULIDO, H. DE LA VARA, P. Análisis y diseño de experimentos. 2004. Pg.13.

3.5 Diseño experimental 2^k

El estudio de la relación de las variables o factores que intervienen en un proceso sobre su resultado actual o una respuesta esperada es de vital importancia. La finalidad del diseño experimental es conocer mejor esta relación y generar conocimientos que permitan tomar decisiones y acciones que mejoren el desempeño del proceso.

El diseño experimental factorial o también llamado arreglo factorial es el conjunto de puntos experimentales que pueden formarse considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores, si la combinación de los k factores viene presentada a dos niveles (máximo y mínimo), el diseño factorial se denota como 2^k experimentos, donde los niveles de cada factor son representados con signos (-) y (+) para el más bajo y más alto respectivamente, y el nivel central es definido como "0".

En el diseño factorial 2^k se aplica una herramienta de vital importancia que es la matriz de diseño, en la cual se distribuyen los puntos experimentales y las combinaciones entre los niveles de los factores existentes en el proceso, se puede construir de la siguiente manera: en el primer nivel o factor A se alternan signos + y - empezando por el negativo o menor (-), hasta alcanzar los 2^k renglones; en la segunda columna se alternan de dos en dos los signos; en la columna tercera se alternan los signos de cuatro en cuatro, y así hasta llegar a la k -ésima columna. Este sistema es utilizado siempre y cuando el diseño responda a la condición " $2 \leq k \leq 5$ ".

N° Ensayo	Factores o variables			
	A	B	C k factor
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+
⋮	⋮	⋮	⋮	
⋮	⋮	⋮	⋮	
⋮	⋮	⋮	⋮	
⋮	⋮	⋮	⋮	
2^k				

**R
E
S
U
L
T
A
D
O
S**

Figura 3.3.- Diseño de una matriz de experimentación.

La matriz de diseño contempla el número de experimentos a realizar y la respuesta individual de cada uno de ellos, es decir, cual es el resultado que se obtiene luego de correr el proceso a determinadas condiciones. Sin embargo existen interacciones entre cada una de las variables que pueden causar cambios significativos en el rendimiento de un proceso, por esta razón la matriz de experimentación puede ampliarse hacia la matriz de contrastes e interacciones en la cual se calcula el efecto que causa su interacción a partir de las respuestas obtenidas en un inicio.

Como se puede ver en la figura 3.4 esta matriz tiene tantas filas como experimentos y tantas columnas como interacciones se encuentren en el modelo planteado.

N° Ensayo	Efectos e interacciones						
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-	-	-	+	+	+	-
2	+	-	-	-	-	+	+
3	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	-	+	+	+	+
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2 ^k							

Figura 3.4.- Diseño de una matriz de contrastes e interacciones

Cada uno de los efectos se estima a partir de su contraste, el cual a su vez se puede obtener de la matriz de contrastes e interacciones, la columna de signos obtenida de la interacción de las variables representa una acción que repercutirá sobre el resultado del rendimiento, por esta razón es necesario saber cuán grande o insignificante puede ser la misma. Esta estimación se obtiene de multiplicar la columna de los signos de contraste por los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos (columna de resultados).

$$Efecto\ ABC\ \dots\ k = \frac{1}{n2^{k-1}} [Contraste\ ABC\ \dots\ k] \quad (3.1)$$

El cálculo manual de cada uno de los contrastes se torna bastante largo mientras más variables se encuentren en un diseño, debido a esto es preciso aplicar herramientas como Excel para facilitar el diseño y reducir el % de error. La opción SUMAPRODUCTO (opción estadística de Excel) se utiliza para estimar el valor de cada efecto.

En los diseños experimentales 2^k , donde $k = 4$ o 5 , es de vital importancia el efecto de las variables y de las interacciones, el número de ensayos o experimentos a realizar suministran la suficiente información de la acción de las variables principales y sus interacciones dobles (información de primer orden), por esta razón el valor numérico de cada efecto proporciona la importancia del factor en el proceso, en otras palabras, los valores que más se alejen de la media ($m = 0$) tanto positiva como negativamente tiene impacto en la respuesta del proceso.

3.6 Efectos en papel normal (*normal probability plots*)

Los efectos obtenidos de un diseño experimental 2^k ($k = 4$ o 5) siguen un patrón de distribución entre los valores significativos y los no significativos, donde; los efectos no significativos tienden a una distribución normal con media igual a cero y una varianza constante, mientras que los efectos significativos tienden a alejarse de la normalidad, esto implica que al ser graficados en un papel probabilístico normal, los efectos menos representativos tienden a formar una línea recta ubicada a la altura del cero sin varianza o cambio en los rendimientos del proceso, mientras que los representativos muestran varianza en el rendimiento.

En la figura 3.5 se puede observar cual es la estructura de una gráfica de normal *Plots*, así como las áreas de importancia y la medía del proceso.

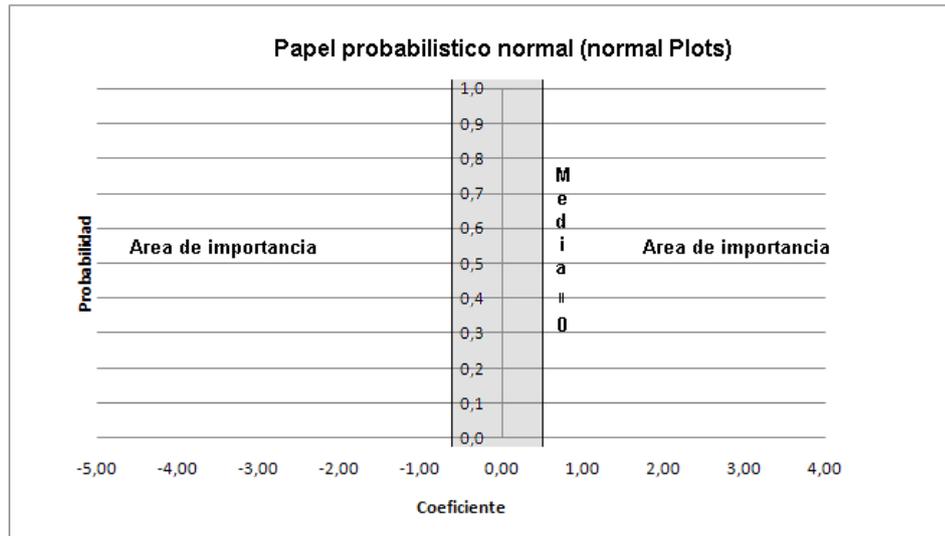


Figura 3.5.- Papel probabilístico normal y sus áreas de representación gráfica

La aplicación del papel probabilístico se utiliza para obtener una nueva gráfica donde se pueda observar los efectos que causan las variables en un proceso, la nueva representación gráfica presenta una recta centrada en cero, esto se obtiene mediante la variación del orden de los datos y la probabilidad acumulada (Z), que no es más que la variable estandarizada en función de la distribución normal de la probabilidad ($1/n$ ensayos).

La aplicación de un modelo *normal Plots* para un diseño experimental sigue los siguientes pasos:

- Se ordenan los efectos obtenidos en la matriz de interacciones de forma creciente.
- Se cuentan los efectos posibles de la matriz
- Se obtiene la probabilidad Z para cada efecto. Todo efecto tiene un porcentaje de probabilidad que depende del número de ensayos realizados; por ejemplo, en un diseño de 16 ensayos la probabilidad para cada efecto sería $1/16$ o $6,25\%$, además la probabilidad para cada efecto es acumulativa, esto quiere decir que para el segundo efecto la probabilidad sería $1/16 + 1/16 = 2/16$ o $12,5\%$, y así hasta el último dato. Por cuestión de facilidad para interpretar la gráfica, la probabilidad no se representa en porcentaje sino en fracción ($1/16 = 0,0625$).

- Se coloca en orden decreciente las probabilidades Z.
- Los efectos representan los valores de X, mientras que las probabilidades representan los valores de Y.
- Interpretación de resultados.

Para la interpretación de datos basta comprender las variables y sus interacciones para saber cuáles son los efectos que causan varianza en la respuesta y como alterarán las posibles variaciones de los mismos, ya que la alteración numérica de un efecto causaría un aumento o decrecimiento en la gráfica de Plots.

3.7 Método de mínimos cuadrados

El método de mínimos cuadrados es una técnica de análisis numérico encuadrada dentro de la optimización matemática, en la que, dados un conjunto de pares se intenta encontrar la función que mejor se aproxime a los datos, de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático, en otras palabras, intenta minimizar la suma de cuadrados de las diferencias ordenadas entre los puntos generados por la función y los correspondientes en los datos. La minimización de la distancia entre la función y los datos genera una mejor apreciación de los datos que más relevancia tienen sobre la experimentación.

Desde un punto de vista estadístico, un requisito implícito para que funcione el método de mínimos cuadrados es que los errores de cada medida estén distribuidos de forma aleatoria.

El método de regresión de mínimos cuadrados responde a la aplicación de la fórmula 3.2:

$$y_j = b_0 + \sum_{j=1}^p b_j * u_j \quad (3.2)$$

Donde p es el número de parámetros del modelo incluyendo la media, u_j es el valor constituido por n valores ± 1 de la j – ésima columna de la matriz del modelo, en otras palabras, multiplica cada uno de los miembros de la columna de una matriz por la fila de otra traspuesta.

$$b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{123} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (3.3)$$

Para el cálculo del modelo de regresión se utiliza la matriz del diseño de experimentación con los valores de las variables (-1) y (+1). En la fórmula 3.4, b representa la respuesta que se busca tras la experimentación o también llamado el efecto de las interacciones, X representa la matriz obtenida del diseño y X^T se utiliza para representar la matriz traspuesta

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (3.4)$$

A continuación se presenta la forma en la que interactúan las matrices 1 y 2 de la formula antes presentada ($X^T X$):

$$\text{Mat.1} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 \end{vmatrix} \quad \text{Mat.2} \begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

El resultado del producto y suma de cada uno de los miembros de las matrices 1 y 2 se representa en la matriz 3, la misma que se eleva a la potencia -1, calculo que se realiza para reducir el nivel de error o también llamado incertidumbre (matriz 4).

$$\text{Mat.3} \left| \begin{array}{cccccccc} 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{array} \right|^{-1} \quad \text{Mat.4} \left| \begin{array}{cccccccc} 1/8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/8 \end{array} \right|$$

La matriz 4 de dispersión (I) obtenida se encuentra multiplicada por el error experimental provocado por la varianza del coeficiente del modelo. Como se puede ver en el caso del diseño experimental factorial, el coeficiente de incertidumbre causado por la experimentación es igual a $1/n$, donde n es igual al número de experimentos realizados. Por lo tanto la fórmula para el cálculo de los mínimos cuadrados sería la siguiente.

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y = \frac{1}{8} I * X^T y = \frac{1}{8} * X^T Y \quad (3.5)$$

$$\text{Mat.5} \left| \begin{array}{cccccccc} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ . \\ . \\ . \\ Y_k \end{array} \right|$$

Cada uno de los valores que resultan de la resolución matricial representa los efectos de las interacciones de las variables del proceso. La matriz 5 representa la matriz de contrastes e interacciones y la columna de respuestas (Y_k) los resultados obtenidos de la experimentación.

CAPITULO 4

BIOGÁS

4.1 Concepto y composición química

Biogás: Mezcla de gases producto del proceso de descomposición anaeróbica de materia orgánica o biodegradable, cuyo principal componente es el metano (Serrano, 2006).

El biogás es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos (bacteria metanogénicas, por ejemplo), y otros factores, en ausencia de aire (ambiente anaeróbico). Cuando la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno, actúa este tipo de bacterias, generando biogás.

El biogás es una mezcla conformada por metano (CH_4) entre el 50 % al 70% y anhídrido carbónico (CO_2), encontrándose pequeñas proporciones de otros gases como el hidrogeno (H_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y sulfuro de hidrogeno (H_2S)². El biogás también puede contener ínfimas cantidades de hongos, bacterias y algunos elementos patógenos. En la Tabla 4.1 se pueden observar las principales propiedades físicas del metano.

Tabla 4.1.- Propiedades físicas de gas metano

Peso molecular	16, 04g
Densidad respecto al aire a 0°C	55%
Punto de ebullición	-161,5°C
Poder calorífico inferior	8570kcal/m ³

El metano es un gas más ligero que el aire y tiende a no a acumularse en el suelo, disminuyendo por consiguiente el peligro de explosión. A continuación en la Tabla 4.2 se expone la composición química del biogás.

Tabla 4.2.- Composición química del biogás

Elemento	Fórmula	%
Metano	CH ₄	50 – 70
Dióxido de carbono	CO ₂	30 – 50
Nitrógeno	N ₂	0,5 – 3
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	0,1 – 1
Vapor de agua		Trazas

Es importante aclarar que este gas puede usarse como combustible sólo cuando el metano se encuentra en concentraciones mayores o iguales a 50 % (J. Guardado, 2005).

4.2 Características del biogás

Las propiedades físicas y químicas del biogás serán, el resultado de sus dos principales componentes: Metano (CH₄) y Gas Carbónico (CO₂). El metano es un gas inodoro, incoloro, insípido, pero los otros compuestos que contiene el biogás, como el anhídrido sulfuroso (H₂S), dan a este un ligero olor a ajo o huevos podridos.

Entre sus propiedades físicas tenemos su capacidad de inflamarse casi sin olores, con llama azul y un calor de combustión equivalente a 21.5 MJ/m^3 (5513 kcal/m^3), pudiendo variar entre 19.7 y 23 MJ/m^3 . Su temperatura de auto-ignición es similar a la del metano puro y varía de 923 K hasta 1023 K ($650\text{-}750 \text{ }^\circ\text{C}$). Como media, el biogás no purificado produce de 20 a 23 MJm^{-3} ($4700\text{-}5500 \text{ kcal/m}^3$) (Hesse 1983).

La mejor aplicación del biogás es el uso doméstico. Al quemarse no produce humo, ni mal olor; por el contrario posee un olor leve y característico de establo. La combustión del gas es completa, minimizando por tanto cualquier olor.

Para su utilización se debe hacer una serie de modificaciones en el quemador de una cocina normal, de la siguiente manera:

- Para adaptar una cocina normal al funcionamiento con biogás, es necesario aumentar el diámetro del inyector y regular el ingreso de aire. Si existe demasiado aire la llama se apagará y el biogás no permanecerá encendido. En cambio si no ingresa suficiente aire, la llama será amarilla y el biogás no ardera debidamente y el calor será deficiente. Con cantidades correctas de aire el biogás arderá apropiadamente con una llama de color azul.
- Dada la variedad de modelos y diseños de cocinas comerciales, el incremento del diámetro del orificio inyector, se convierte en una operación experimental hasta conseguir una llama azul estable.

El biogás también puede ser utilizado para la iluminación, ya sea directamente con lámparas incandescentes, o para mayor comodidad por medio de un generador eléctrico que utilice como combustible el biogás.

- Para la adaptación de lámparas a gas, se debe proceder de manera idéntica a la calibración del inyector de una cocina, incrementado su diámetro hasta un óptimo funcionamiento.

Mezclas de biogás con aire, en una relación 1:20, forman un gas detonante altamente explosivo, lo cual permite que también sea empleado como combustible en motores de combustión interna adaptados, tanto en motores de gasolina como de diesel.

La utilización de los biodigestores además de permitir la producción de biogás, ofrece enormes ventajas para la transformación de desechos:

- Mejora la capacidad fertilizante del estiércol; todos los nutrientes inorgánicos como N_2 , P y Mg, así como otros elementos menores se conservan en el efluente. En el caso del nitrógeno, buena parte del mismo presente en el estiércol en forma de macromoléculas es convertido en su forma más simple, en amonio (NH_4^+), la cual es aprovechada directamente por las plantas. Se debe conocer que el estiércol secado al ambiente, pierde alrededor de un 50% de N_2 .
- Control de patógenos: aunque el nivel de destrucción de patógenos variará de acuerdo a factores como temperatura y tiempo de retención, se ha demostrado experimentalmente que alrededor del 85% de patógenos no sobreviven al proceso de digestión.

En la Tabla 4.3 se resumen las características de los principales componentes del biogás.

Tabla 4.3.- Resumen de características de los componentes del biogás:

CARACTERÍSTICAS	CH ₄	CO ₂	H ₂ -H ₂ S	OTROS	BIOGÁS 60/40
% por Volumen de Biogás	55-70	27-44	1	3	100
Valor Calórico MJ/m ³	35,8	-	10,8	22	21,5
Valor Calórico kCal/m ³	8600	-	2581	5285	5140
Temp. de ignición °C	650-750	-	-	-	650-750
Densidad relativa	0,55	2,5	0,07	1,2	0,83
Inflamabilidad Vol. % aire	5-15	-	-	-	6-12

Algunos análisis han reportado la presencia de oxígeno (O₂) en pequeñísimas cantidades, pero debido a la sensibilidad de las bacterias metanogénicas al oxígeno libre, parece que éste, es más bien un agente exógeno contaminante, en lugar de un producto de la reacción.

4.3 Diferencias entre en biogás y el gas natural

La composición y propiedades del biogás son diferentes a las del gas natural y varían de acuerdo al tipo de materia orgánica y el proceso que se utilice para obtenerlo. El biogás se obtiene a partir de excrementos animales, desechos del agro, residuos de destilerías, rellenos sanitarios, entre otros. A continuación se indican algunas propiedades típicas del gas natural y del biogás de rellenos sanitarios, así como de algunos componentes que casi no existen en el gas natural. Las concentraciones de los distintos componentes del gas natural y el biogás se muestran a continuación en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Concentraciones típicas de diferentes elementos en biogás y gas natural.

	Biogás de relleno sanitario	Gas Natural
Propiedades		
Poder calorífico bruto (MJ/m ³)	17	40
Densidad relativa	0.7	0.8
Densidad (kg/m ³)	0.8	0.7
Composición [1]		
H ₂ (Mol%)	1.5	-
O ₂ (Mol%)	1	<0.01
H ₂ S (mg/m ³)	<100	1.5
NH ₃ (mg/m ³)	5	-
Cl (mg/m ³)	0 – 800	-
F (mg/m ³)	10	-
Siloxanos (mg/m ³)	0 – 50	-

Uno de los aspectos que diferencia el biogás del gas natural es el hecho de que el biogás contiene elementos que pueden ser potencialmente perjudiciales para la salud, las plantas, los animales y los equipos de los usuarios. La mayor preocupación está relacionada con los componentes traza de naturaleza orgánica. El cloruro de vinilo y el benceno se consideran los compuestos más críticos debido a sus efectos cancerígenos (Minambiente 2002, Colombia).

Pinchbeck (2007) indica que no es posible retirar el 100% de los componentes indeseados del biogás y que hay poca o ninguna información sobre las concentraciones máximas permisibles para mantener riesgos aceptables en la gente, animales, plantas y los equipos expuestos al biogás.

Alrededor del mundo operan muchos proyectos de biogás a gran escala o de uso industrial que utilizan diferentes materiales orgánicos para su producción, y hay millones de biodigestores pequeños que producen biogás para uso doméstico, especialmente en China e India. Este combustible tiene diferentes aplicaciones tales como uso térmico directo (quemadores), calderas, generación de electricidad, cogeneración (vapor y electricidad) y combustible para vehículos, entre otros. Durante 2006 cerca del 60% del biogás producido en los países de la Unión

Europea provino de rellenos sanitarios y se generaron más de 17000 GWH de energía eléctrica a partir del biogás producido con diferentes materiales orgánicos (Pascual, 2008).

En algunos casos el biogás se inyecta en las redes de distribución de gas natural, de tal forma que el usuario recibe una mezcla de gas natural y biogás. Este es el caso de varias localidades de Europa y el de Santiago de Chile donde se utiliza el biogás de rellenos sanitarios (Pinchbeck 2007, Monreal 1999).

En principio, todos los motores pueden ser adaptados a biogás, pero los más comúnmente usados son los motores de gas-Otto y los de gas-Diesel (Dohne 1998). Esto quiere decir que un metro cúbico de biogás puede compararse con 0.4 kg de diesel, 0.6 kg de petróleo o 0.8 kg de carbón. La Figura 4.1 muestra un resumen de los usos y poder energético de un metro cubico de biogás.

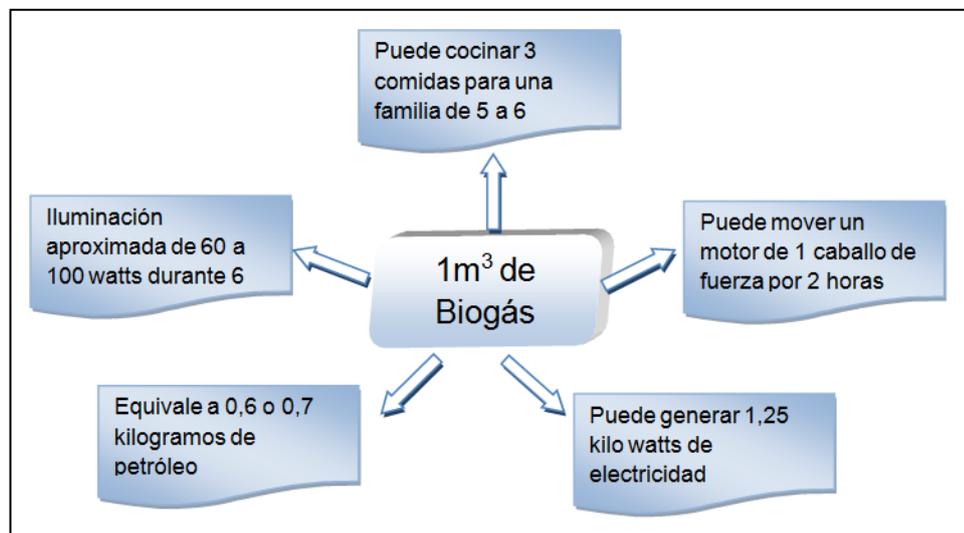


Figura 4.1.- Resumen de equivalencias energéticas y usos del biogás.

En las Figuras 4.2 y 4.3, se observan los contenidos de sólidos totales y humedad del estiércol de cerdo y res respectivamente.

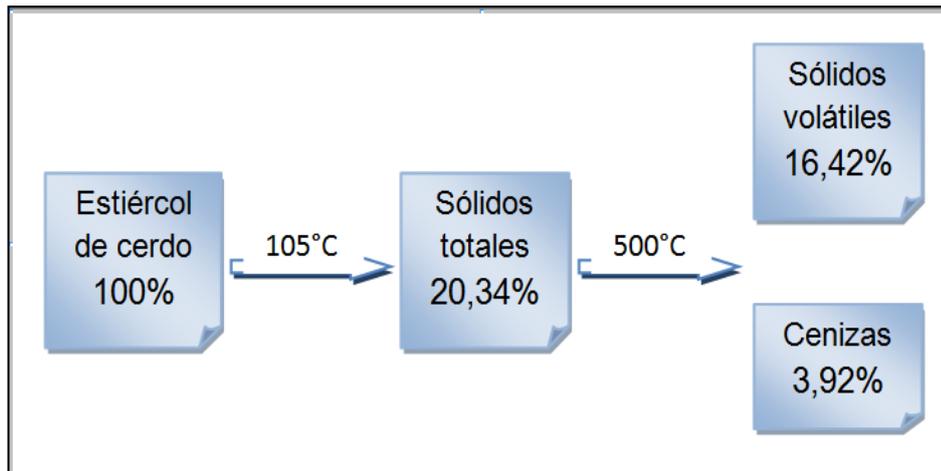


Figura 4.2.- Análisis de sólidos y humedad de estiércol de cerdo

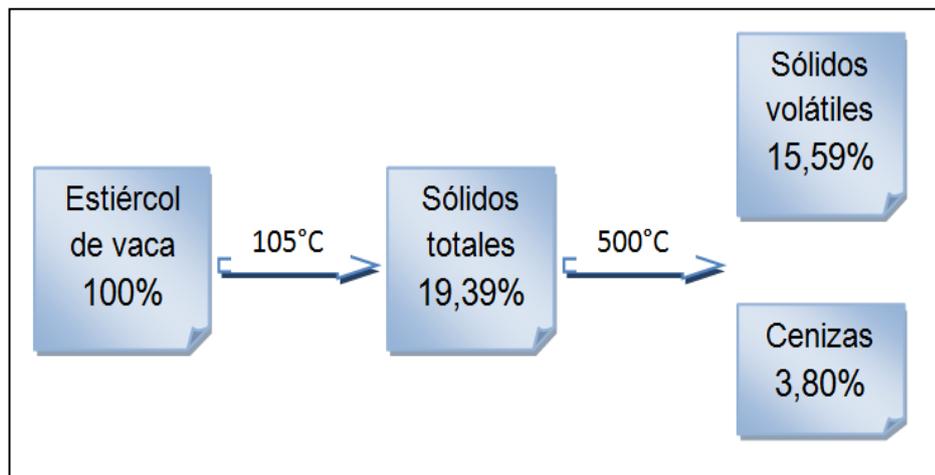


Figura 4.3.- Análisis de sólidos y humedad de estiércol de vaca

4.4 Determinaciones analíticas para cualificar y cuantificar metano

Para corroborar que un experimento de obtención de biogás fue exitoso, es necesario realizar análisis químicos y físicos con los cuales se demuestra si es que existe la producción de biogás, y si este tiene la cantidad suficiente de metano para ser empleada como combustible (contenido mayor al 50% de metano).

Existen varios análisis basados principalmente en métodos indirectos para conocer la cantidad de metano generado en un biodigestor, como es el conocimiento de la

cantidad de CO₂, junto con otros compuestos formados con este, y por una simple diferencia de porcentajes se puede conocer un aproximado el porcentaje de metano producido. Gracias a la cromatografía de gases es posible conocer con exactitud todos los gases generados en una fermentación anaerobia, así como sus porcentajes.

En el desarrollo de este trabajo solo se precedió a cualificar el metano contenido en el gas formado por los biodigestores mediante cromatografía de gases a través de muestras tomadas directamente de los fermentadores, debido a la carencia de equipo necesario para la toma de muestras de precisión de gases.

CAPITULO 5

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN.

5.1 Sensores

Un sensor es un aparato capaz de transformar variables del entorno, en magnitudes eléctricas una vez que se realiza la transducción. Existen diversos tipos de sensores de acuerdo a la magnitud del entorno que miden, estos pueden ser de temperatura, presión, etc.

5.1.1 Sensores de Temperatura

Un sensor de temperatura es un elemento que convierte la intensidad de calor en una variación eléctrica ya sea esta de voltaje, corriente o resistencia. Este sensor garantiza una salida continua en función de la temperatura real del sistema, lo que permite controlar por completo el proceso.

La señal de salida del sensor puede ser:

- Resistencia eléctrica (Ohm), RTD, NTC / PTC
- Tensión, tales como: termo pares, sensores integrados; entre otros.
- Corriente eléctrica (mA) / tensión si el sensor ya incluyera un transmisor (4 -20 mA, por ejemplo).

El modelo básico de sensor en cuestión se aprecia en la figura 5.1

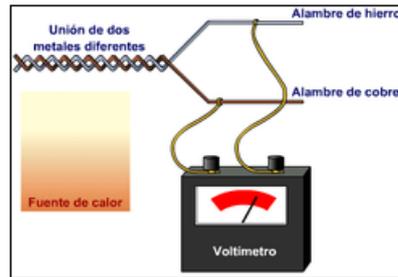


Figura 5.1.- Sensor de Temperatura

Fuente: Sensores Industriales, Sensor de Temperatura RTD, <http://cristian-sensoresindustriales.blogspot.com/>, 2009

Existen diversos tipos de sensores de temperatura entre los cuales podemos citar los siguientes.

- **Termopar**

Un termopar es un dispositivo formado por la unión de dos metales distintos que produce un voltaje (efecto Seebeck), que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado "punto caliente", unión caliente o de medida y el otro denominado "punto frío", unión fría o de referencia.

- **RTD**

Los RTD son sensores de temperatura resistivos. En ellos se aprovecha el efecto que tiene la temperatura en la conducción de los electrones, para que ante un aumento de temperatura, haya un aumento de la resistencia eléctrica.

- **NTC**

NTC son resistencias de coeficiente de temperatura negativo, constituidas por un cuerpo semiconductor cuyo coeficiente de temperatura es elevado, es decir, su conductividad crece muy rápidamente con la temperatura.

Se emplean en su fabricación óxidos semiconductores de níquel, zinc, cobalto, etc.

5.1.1.1 Sensor de Temperatura LM35

El Sensor de Temperatura LM35, que se utilizara para el equipo y que se muestra en la figura 5.2 presenta las siguientes especificaciones físicas, así como sus curvas de funcionamiento.



Figura 5.2.- Presentación Física del LM35C

Fuente: National Semiconductor, Sensor LM35

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS005516.PDF>. 1994

El LM35 es un sensor de temperatura con una precisión calibrada de 1°C. Puede medir temperaturas en el rango que abarca desde -55°C a + 150°C. La salida es muy lineal y cada grado centígrado equivale a 10mV en la salida.

Sus características más relevantes son:

- Precisión de ~1,5°C (peor caso), 0.5°C garantizados a 25°C.
- No linealidad de ~0,5°C (peor caso).
- Baja corriente de alimentación (60uA).
- Amplio rango de funcionamiento (desde -55° a + 150°C).
- Bajo costo.
- Baja impedancia de salida.

Las siguientes curvas de funcionamiento detalladas en las figuras 5.3 y 5.4 fueron obtenidas de la hoja de datos del sensor.

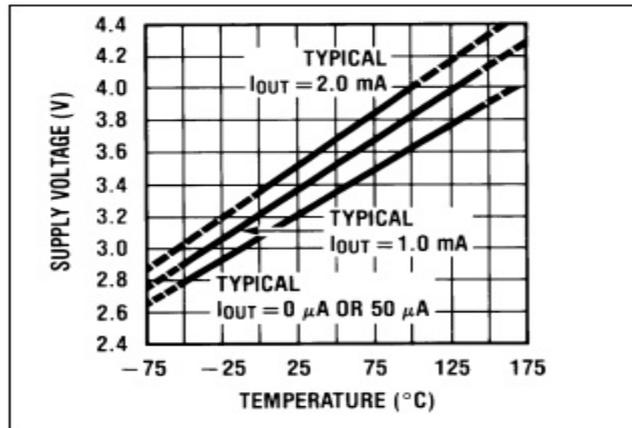


Figura 5.3.- Tensión de Alimentación vs. Temperatura.

Fuente: National Semiconductor, Curvas Típicas de Rendimiento, <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS005516.P> DF. 1994

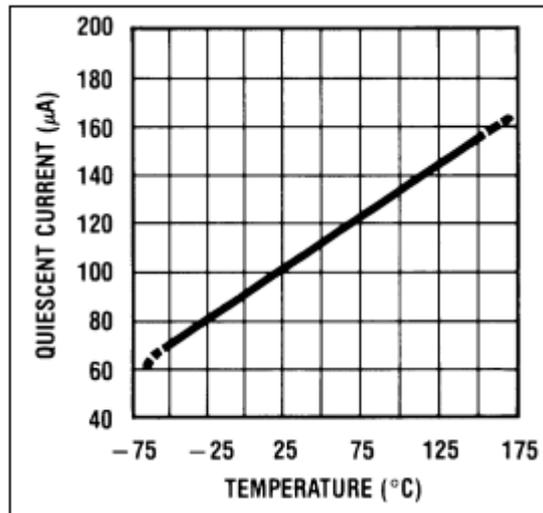


Figura 5.4.- Corriente de Reposo vs. Temperatura.

Fuente: National Semiconductor, Curvas Típicas de Rendimiento, <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS005516.P> DF. 1994

El sensor de Temperatura LM35C se conecta a una resistencia de 220Ω a la salida del integrado con respecto a tierra, para poder obtener una señal totalmente lineal. Como una ventaja se puede mencionar que no se necesita ningún otro circuito adicional para su calibración externa, como se presenta en la figura 5.5

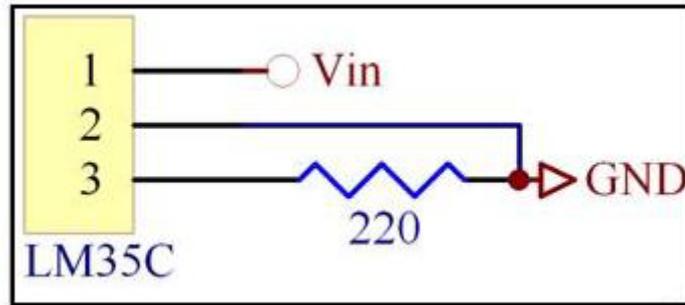


Figura 5.5.- Diagrama de Polarización del Sensor.

5.1.2 Sensor de Presión

La presión actúa sobre una membrana muy elástica, y mide su deformación. Para medir la deformación puede recurrirse a diferentes principios físicos.

A continuación se ilustra la estructura del sensor de presión en la figura 5.6

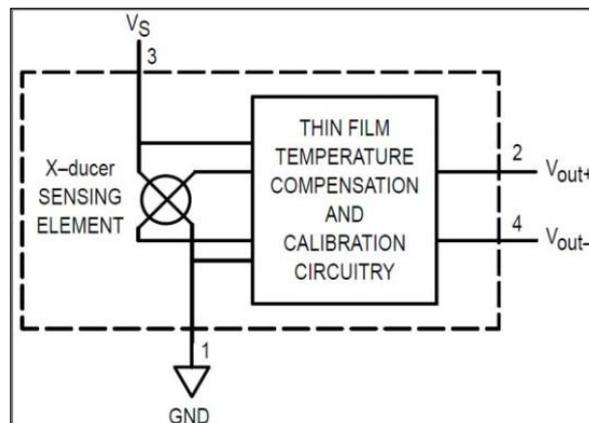


Figura 5.6.- Sensor de Presión.

Fuente: Motorola, Diagrama esquemático del compensador de temperatura, <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/motorola/MPX2200D.pdf>. 1997

La piezoelectricidad (del griego *piezein*, "estrujar o apretar") es un fenómeno presentado por determinados cristales, que al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización eléctrica en su masa, apareciendo una diferencia de

potencial y cargas eléctricas en su superficie. Este fenómeno también se presenta a la inversa, esto es, se deforman bajo la acción de fuerzas internas al ser sometidos a un campo eléctrico. El efecto piezoeléctrico es normalmente reversible: al dejar de someter los cristales a un voltaje exterior o campo eléctrico, recuperan su forma.

5.1.2.1 Sensor de Presión mpx2200

El Sensor de Presión mpx2200, que se utilizara para el equipo presenta las siguientes especificaciones físicas y curvas de funcionamiento. En la figura 5.7 se aprecia en la disposición física del sensor.

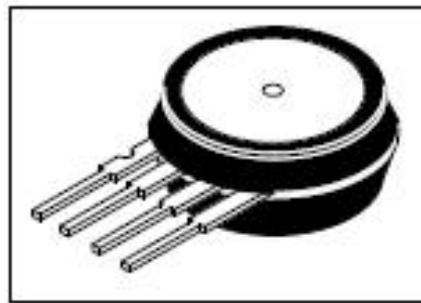


Figura 5.7.- Presentación Física del MPX2200D

Fuente: Motorola, Encapsulado típico,
<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/motorola/MPX2200D.pdf>. 1997

El dispositivo de serie MPX2200 es un sensor de presión de silicio piezoresistivos que proporciona un voltaje de salida de alta precisión y lineal directamente proporcional a la presión aplicada.

El sensor se constituye de sola membrana de silicio monolítico con el indicador de tensión y una película delgada de la resistencia de la red integrada en el chip. El chip es un láser ajustado para la duración precisa y el desplazamiento de calibración y compensación de temperatura. Están diseñados para su uso en aplicaciones tales como: bombas, controladores de motor, la robótica, los indicadores de nivel, diagnóstico médico, el cambio de presión, barómetros, altímetros, etc. Entre sus características se puede mencionar.

- Temperatura compensada desde 0°C hasta +85°C.
- Chips de fácil uso por la variedad de encapsulados que ofrece el fabricante.

Las Dimensiones físicas correspondientes se aprecian en la figura 5.8:

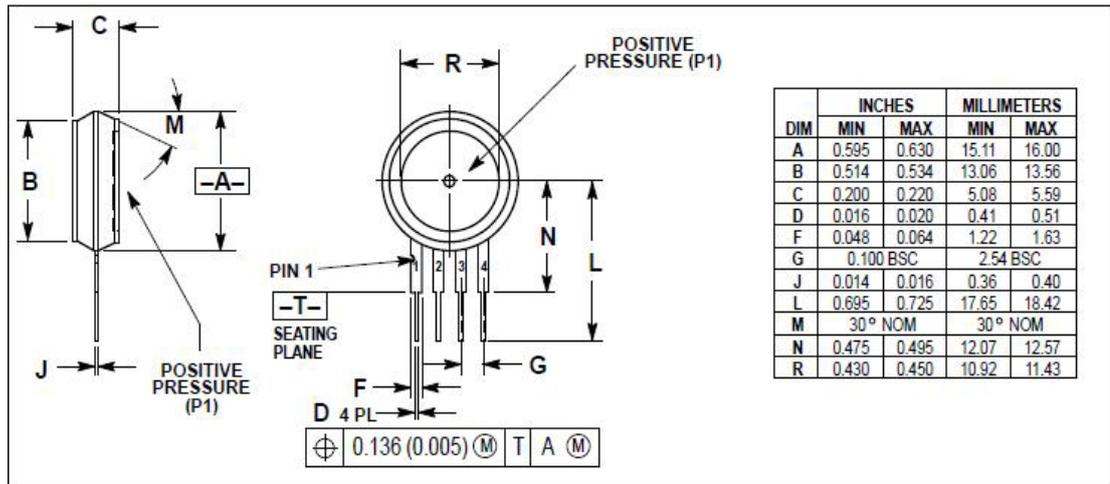


Figura 5.8.- Dimensiones físicas obtenidas de la hoja de datos del MPX2200D.

Fuente: Motorola, Dimensiones del encapsulado,
<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/motorola/MPX2200D.pdf>. 1997

Las Curvas de funcionamiento del sensor son ilustradas en las figuras 5.9 y 5.10 respectivamente.

Las siguientes curvas de funcionamiento detalladas a continuación fueron obtenidas de la hoja de datos del sensor.

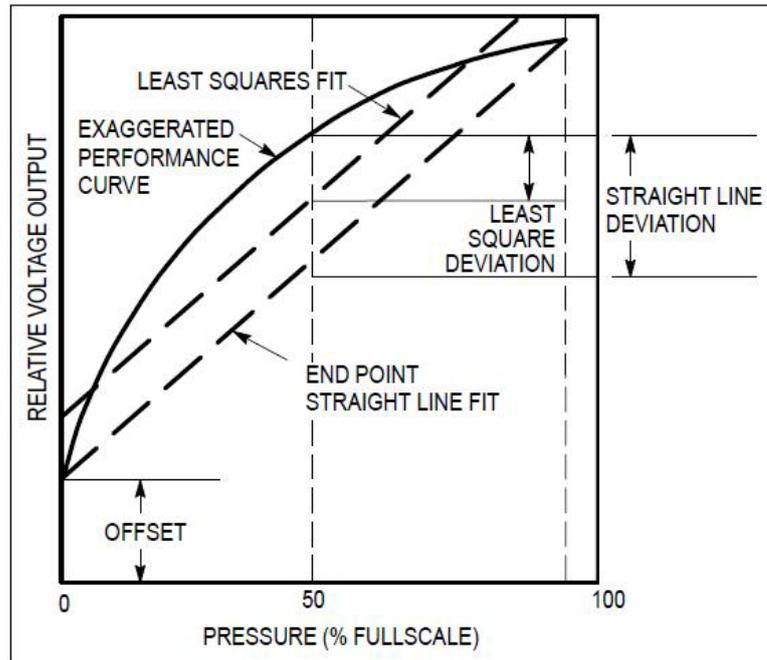


Figura 5.9.- Comparación de especificaciones de linealidad

Fuente: Motorola, Linealidad,

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/motorola/MPX2200D.pdf>. 1997

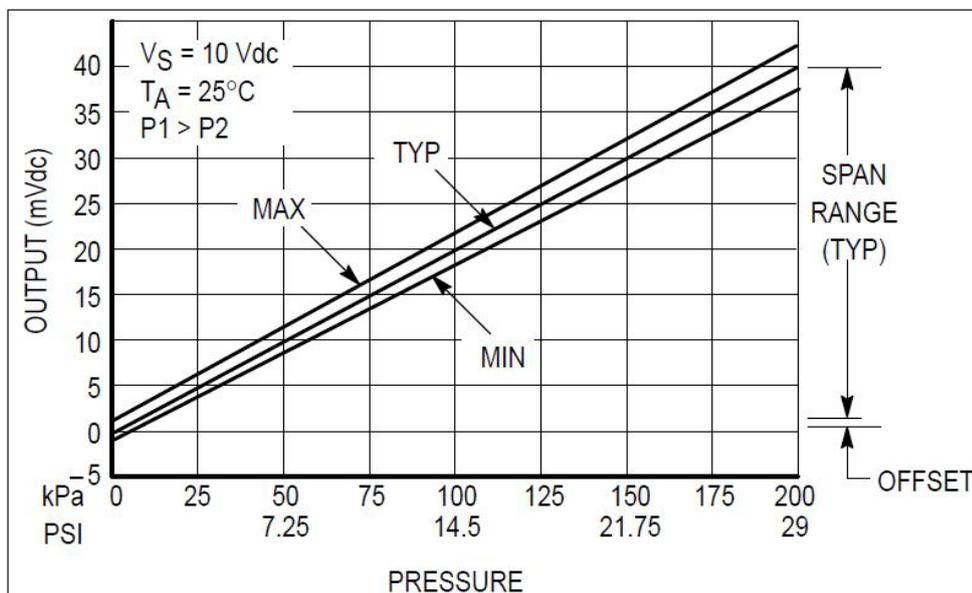


Figura 5.10.- Salida vs Presión diferencial.

Fuente: Motorola, Calibración y compensación de temperatura interna,
<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/motorola/MPX2200D.pdf>. 1997

Como se aprecia en la figura 5.11 contiene dos etapas:

- La primera etapa son unos buffer o seguidores de tensión, la utilización para el acople de impedancias.
- La segunda etapa es un amplificador instrumental con una ganancia teórica de 96.8.

La implementación de este circuito resulta necesario debido a que la señal está en el orden de los mili-voltios. En el Amplificador Instrumental se recomienda utilizar el integrado TL082 porque tiene un bajo offset y entradas mosfet.

Cálculo para el Amplificador Instrumental se ilustra en las siguientes ecuaciones:

$$GD = \frac{R1}{R2} + \frac{2R1}{R3} + 1 \quad (5.1)$$

Reemplazando los valores en la ecuación 5.1 se obtiene.

$$100 = \frac{22K}{10K} + \frac{2(22K)}{x} + 1 \quad x = 454.54 \cong 470\Omega \quad (5.2)$$

De la ecuación 5.2 se obtiene el valor de resistencia a utilizar en el amplificador instrumental.

$$GD = \frac{22K}{10K} + \frac{2(22K)}{470\Omega} + 1 = 96.8 \quad (5.3)$$

Como se aprecia en la ecuación 5.3 el valor real de la ganancia del amplificador instrumental es de 96.8

La figura 5.11 se indica el circuito empleado para el sensor, diseñado en el software prótel 99.

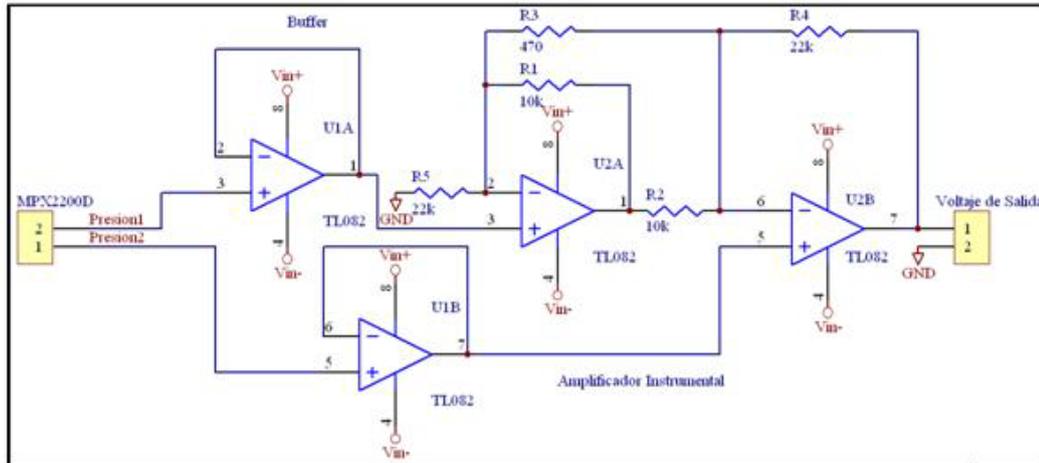


Figura 5.11.- Diagrama de polarización del sensor

5.1.3 Sensor de pH

El método determina el pH midiendo el potencial generado (en mili volts) por un electrodo, este potencial se compara contra un electrodo de referencia, que genera un potencial constante e independiente del pH. El electrodo de referencia que se utiliza es el de calomel saturado con cloruro de potasio, el cual sirve como puente salino que permite el paso de los mili volts generados hacia al circuito de medición.



Figura 5.12.- Sensor de pH

Fuente: Thermo Scientific, Especificaciones del producto,
http://www.barnsteadthermolyne.com/eThermo/CMA/PDFs/Product/productPDF_6903.pdf. 2008

Adicionalmente se muestran los diferentes tipos de sensores de pH.

- **Sensores Electroquímicos**

Son aquellos que utilizan dispositivos que transducen la actividad química del ión de hidrógeno en una señal eléctrica. En esta categoría se destacan aquellos sensores que cuentan con Electrodo de Ion Selectivo (ISE por sus siglas en inglés): de vidrio, de membrana líquida y de metal-óxido de metal. Una sección aparte merecen los ISFET (Ion Selective Field Effect Transistor).

- **Sensores ópticos**

Estos sensores se basan en “indicadores ópticos” de pH que cambian sus propiedades ópticas en función del analito. Dependiendo de la propiedad óptica que cambia, los sensores pueden clasificarse en: sensores de absorbancia o luminiscencia.

5.1.3.1 Sensor de pH electrodes - Thermo-Scientific

El Sensor de pH, que se utilizara para el equipo presenta las siguientes especificaciones físicas y curvas de funcionamiento.

- Una rápida respuesta a las muestras con una estabilidad del 0.01 pH.
- Fiable
- Estables, resultados rápidos, independientemente de la temperatura o composición de la muestra

Posee las siguientes características:

- Rango 0 a 14 PH
- Precisión 0.01
- Rango de Temperatura 0 a 100°C

Como se observa en la figura 5.14 se implementó un circuito de dos etapas:

- La primera etapa son unos buffer o seguidores de tensión, es utilizado para el acople de impedancias.
- La segunda etapa es un amplificador instrumental AD620 con una ganancia 10, implementada con un filtro pasa bajo diferencial de 40Hz.

Es evidente la presencia de ruido de alta frecuencia, que puede ser causado por la fuente de alimentación o interferencias de radio frecuencia, haciendo necesario un filtro pasa bajo, tanto para el modo diferencial como para el modo común, que debe ser puesto antes del amplificador para evitar la rectificación de la señal de ruido en la etapa de entrada.

Calculo para el Filtro RC se ilustra en las siguientes ecuaciones:

$$C_1 = 0.1\mu f 2 \quad f_c = 40Hz$$

Se recomienda utilizar la siguiente igualdad para un buen filtrado: $C_2 = 10C_1$

$$C_2 = 20(0.1\mu f) = 2\mu f = 2.2\mu f \quad (5.4)$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi R_1(2C_2 + C_1)} \quad (5.5)$$

$$0.1\mu f = \frac{1}{2\pi R_1((2 + 2\mu f) + 0.1\mu f)} \quad (5.6)$$

$$R_1 = 10K\Omega \quad (5.7)$$

El ancho de banda calculada se aprecia en la ecuación 5.8

$$BW_{dif} = \frac{1}{2\pi(10K\Omega)((2 * 2\mu f) + 0.1\mu f)} = 3.88Hz \quad (5.8)$$

En la figura 5.14 se aprecia el circuito interface analógico utilizado para el sensor, el cual consiste de un amplificador instrumental AD620 y un buffer.

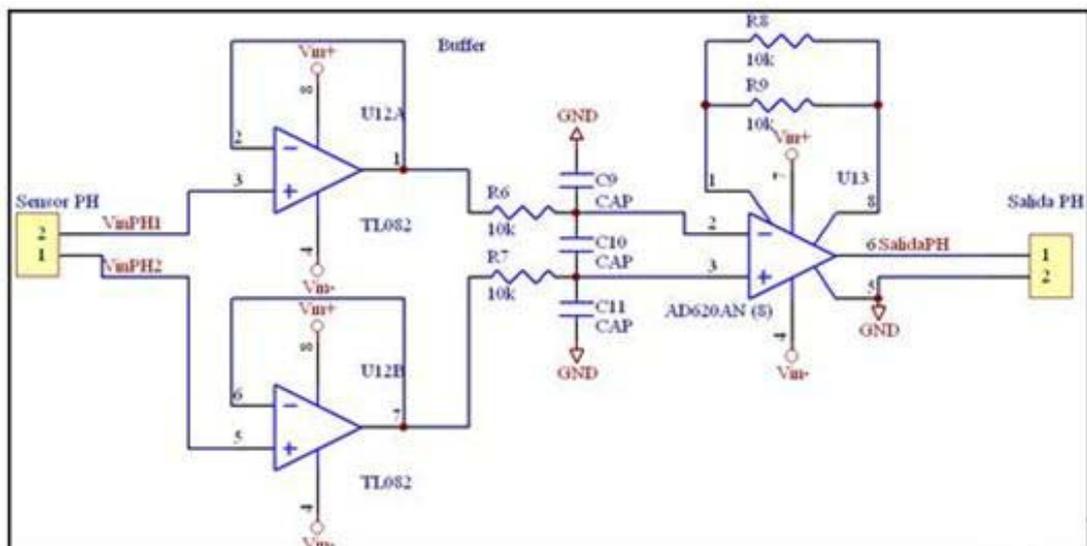


Figura 5.14.- Diagrama de polarización del sensor.

5.2 Actuadores

Se denominan actuadores a aquellos elementos que pueden provocar un efecto sobre un proceso automatizado.

Los actuadores son dispositivos capaces de generar una fuerza a partir de líquidos, de energía eléctrica y gaseosa. El actuador recibe la orden de un regulador o controlador y da una salida necesaria para activar a un elemento final de control como lo son las válvulas.

Existen tres tipos de actuadores.

- *Hidráulicos*
- *Neumáticos*
- *Eléctricos*

5.2.1 Electroválvula

Una electroválvula es un dispositivo diseñado para controlar la salida de un fluido.

Una electroválvula tiene dos partes fundamentales.

- El solenoide convierte energía eléctrica en energía mecánica para controlar la válvula.
- La válvula.

En la figura 5.15, se aprecia el modelo básico de una electroválvula.



Figura 5.15.- Electrovalvula

Fuente: Steven Engineering Inc., Two-way solenoid valve
https://stevenengineering.com/Tech_Support/PDFs/63SKINR.pdf. 1988

5.2.1.1 Electrovalvula V5J71710

En la figura 5.16 se observa la electrovalvula empleada en el trabajo de graduación.



Figura 5.16.- Presentación Física de la electrovalvula

Fuente: Steven Engineering Inc., Two-way solenoid valve
https://stevenengineering.com/Tech_Support/PDFs/63SKINR.pdf. 1988

Como se ilustra en la figura 5.17, se emplea un relé para realizar un control ON/OFF con brecha diferencial de la electrovalvula mediante la saturación del transistor.

Presenta las siguientes características.

- 50 PSI
- 24 VDC
- 11 W

Interface analógico del actuador empleado, el cual es representado en la siguiente figura 5.17.

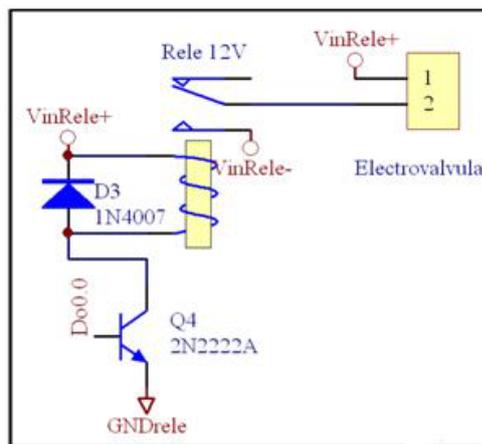


Figura 5.17.- Diagrama de control del actuador.

5.2.2 Motor

Un motor es la parte de una máquina capaz de transformar cualquier tipo de energía (eléctrica, de combustibles fósiles), en energía mecánica capaz de realizar un trabajo.

Según la Ley de Lorentz, cuando un conductor por el que pasa una corriente eléctrica se sumerge en un campo magnético, el conductor sufre una fuerza perpendicular al plano formado por el campo magnético y la corriente, siguiendo la regla de la mano derecha.

$$F = B \cdot l \cdot I$$

- **F:** Fuerza en newtons
- **I:** Intensidad que recorre el conductor en amperios
- **l:** Longitud del conductor en metros lineales
- **B:** Inducción en teslas

5.2.2.1 Motor Bodine Electric Company

Las figuras 5.18 y 5.19 que se ilustran a continuación, muestran el motor empleado en el presente trabajo y el reductor de velocidad que este contiene.



Figura 5.18.- Presentación Física del Motor

Fuente: Bobine Electronic Company, Reductor de velocidad del motor
http://www.recycledgoods.com/35919_Bodine%20Electric%20Company_NSH-12R_1/70%20HP%201725%20RPM%20Speed%20Reducer%20Motor.html. 1998

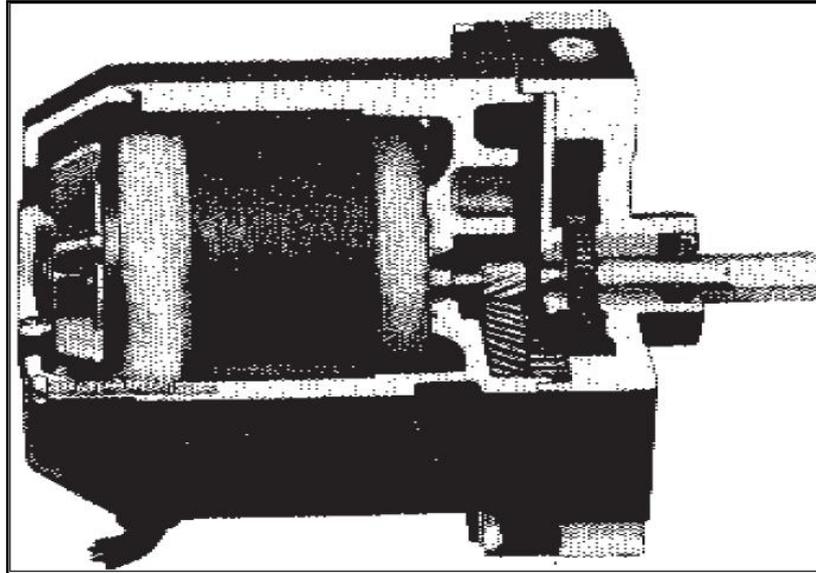


Figura 5.19.- Presentación Física de reducción por engranes del Motor

Fuente: Bobine Electronic Company, Reductor de velocidad del motor

http://www.recycledgoods.com/35919_Bodine%20Electric%20Company_NSH-12R_1/70%20HP%201725%20RPM%20Speed%20Reducer%20Motor.html. 1998

Como se observa en la figura 5.20 se emplea un relé para realizar un control ON/OFF del motor mediante la saturación del transistor.

Sus principales características son.

- 1/70 Hp
- 0.32 A
- 1700 rpm
- 110 V

La interface analógica para el actuador se detalla a continuación a través de la figura 5.20.

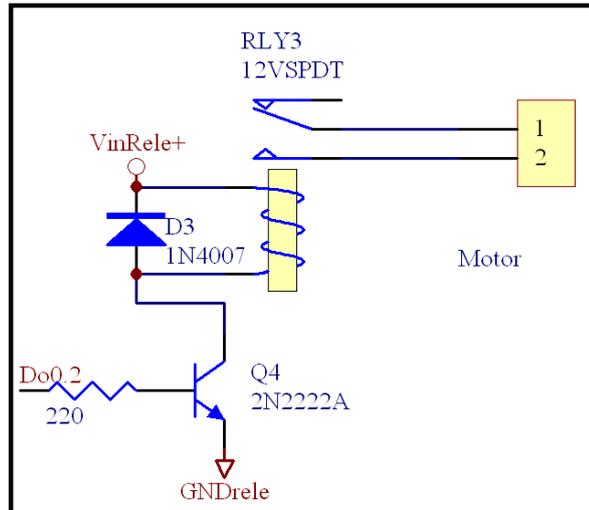


Figura 5.20.- Diagrama del control del actuador

5.2.3 Niquelina

Es un dispositivo termodinámico que utiliza energía para elevar la temperatura del agua.

Las niquelinas están compuestas por un tubo de poliamida y por una resistencia eléctrica de TITANIO. El agua se calienta al entrar en contacto con la resistencia del interior del tubo, como se ilustra en la figura 5.21.

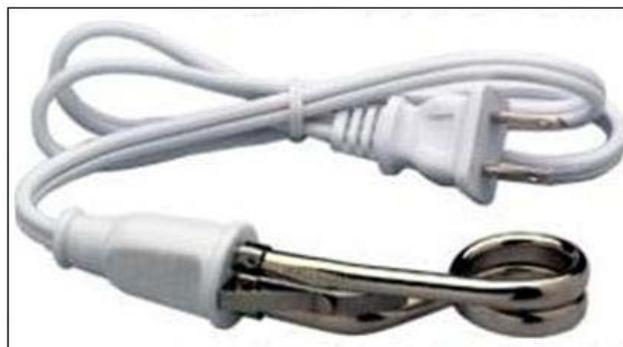


Figura 5.21.- Presentación Física de la Niquelina

Fuente: Abcpedia, calentadores eléctricos domésticos,
<http://www.abcpedia.com/hogaryplantas/calefaccion/calentadores.html>. 2009

Se emplea un relé que comanda a un contactor para el control ON/OFF con brecha diferencial de la niquelina, ya que en esta circula una corriente de 25A. Sus principales características.

- 240V
- 25A
- 6000W

El Interface analógica se aprecia en la figura 5.22

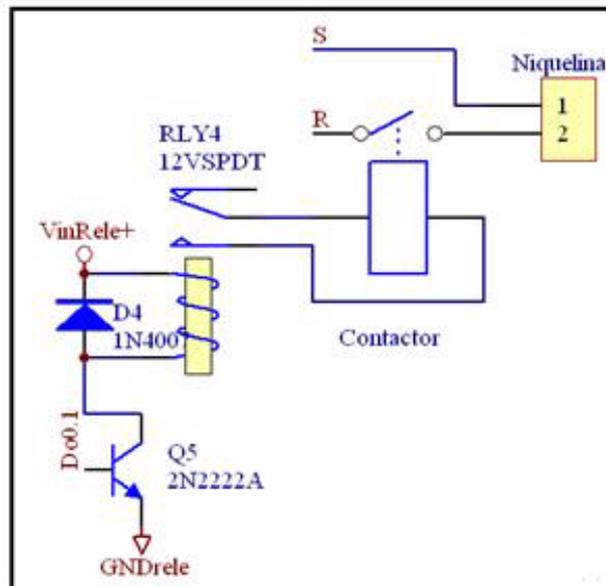


Figura 5.22.- Diagrama de control del actuador.

5.3 Diseño de la Placa de Control

Para el diseño del hardware digital del equipo se utilizó el CAD electrónico Prótel 99 pues las herramientas que este nos brinda, permite obtener un diseño con márgenes de calidad profesionales acorde a los avances tecnológicos del diseño y construcción de placas electrónicas.

La fuente de poder del circuito, está diseñada con un puente rectificador de Graetz, este elemento permite proteger los integrados 78L12 y 79L12 de los cambios de polaridad, el integrado 78L12 y 79L12 son los encargados de proporcionar un voltaje constante de 12V y -12V respectivamente para la alimentación de todo el circuito, además consta de condensadores que filtran la señal de salida.

Esta fuente consta de dos partes.

- La primera es la fuente para los sensores.
- La segunda es la fuente de potencia.

Se utiliza fuentes diferenciales para no introducir ruidos a las señales de los sensores, como se ilustra en la figura 5.23

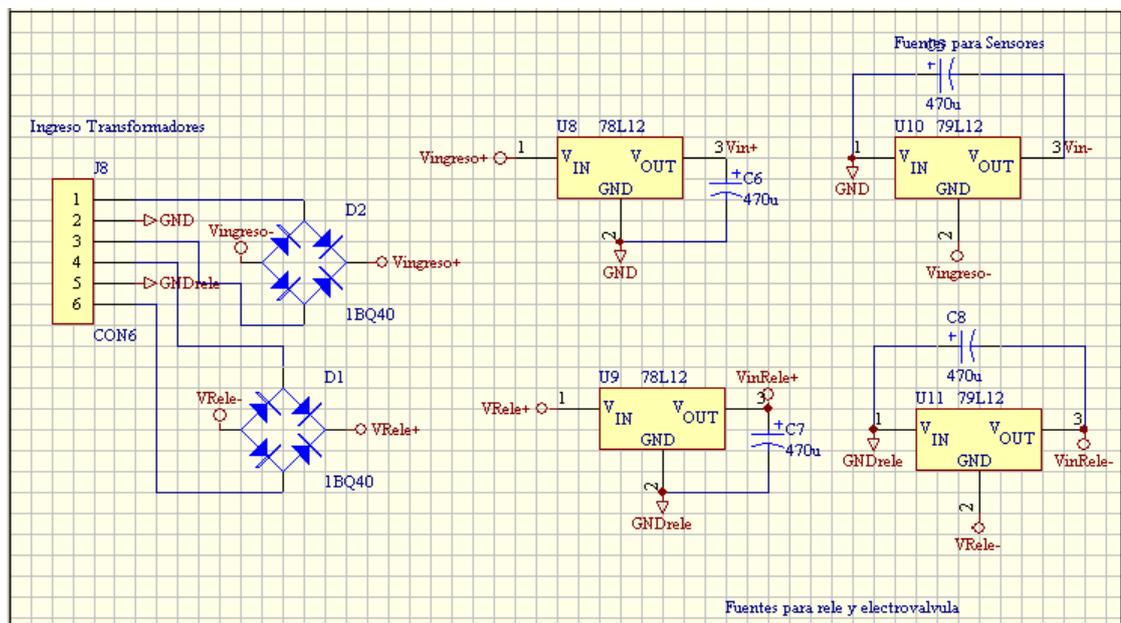


Figura 5.23.- Circuito esquemático de la fuente de alimentación

5.3.1 Diseño del PCB y Ruteado

Una vez realizado el diseño esquemático del circuito, se procede a cargar los footprints (huellas) de los componentes a utilizar en el circuito, se realiza el posicionado de los componentes tomando en cuenta que para el ruteo no debería existir cruces innecesarios y que por seguridad las líneas de datos deben estar separadas de las líneas de alimentación.

Luego de realizar el posicionado de los componentes se procede a cargar las reglas del ruteo, en las que se toma en cuenta las donas (agujeros) para la suelda, espesor de líneas de datos y alimentación, plano de tierra, se especifica si el ruteo es simple o de doble cara, el tamaño de la placa de acuerdo al posicionado, se coloca el dibujo del componente con su identificación respectiva, que servirá de guía para el montaje de los componentes en la placa.

A continuación se presenta el ruteo y PCB en la figura 5.24 que irá impreso en la placa del equipo.

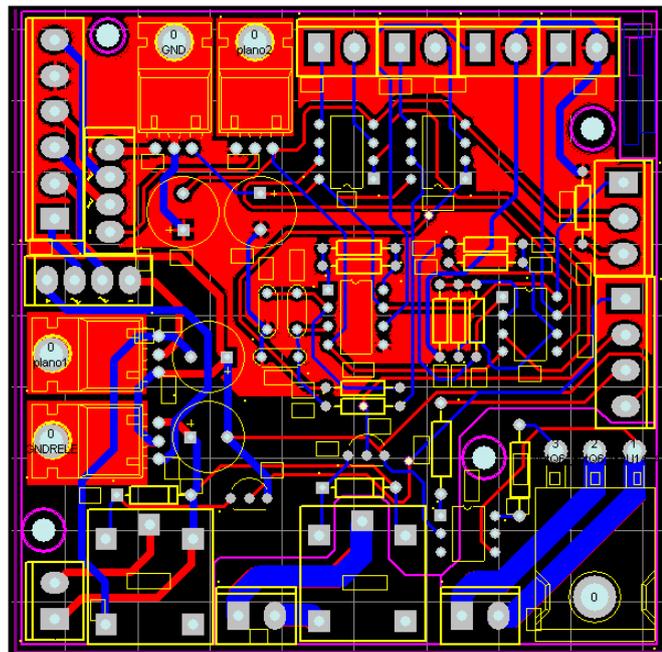


Figura 5.24.- Presentación del ruteo

5.3.2 Montaje

Al hablar del montaje de los componentes de la placa, nos referimos a la lista de los materiales y los gráficos impresos en la placa que permitirán su correcta ubicación.

Utilizando una opción tridimensional de prótel, se muestra a continuación en la figura 5-25 un boceto del montaje final de la placa y en la figura 2-26 la imagen placa que será implementada en el biodigestor.

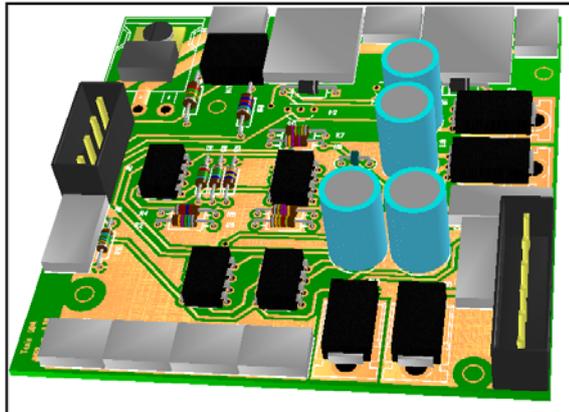


Figura 5.25.- Presentación en 3D del circuito.

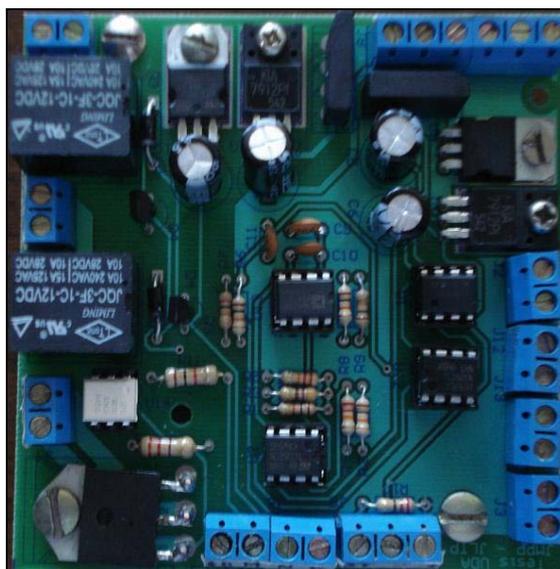


Figura 5.26.- Presentación del circuito

5.4 Diseño del firmware del controlador

El control del sensor de temperatura se basa en un sistema ON/OFF con brecha diferencial, debido a que este controla dos actuadores: la niquelina y la electroválvula respectivamente, para un mejor control de producción.

El motor es un sistema de control ON/OFF; tanto el sensor de presión como de PH son sistemas de medición del producto es cuestión.

5.4.1 Control de temperatura on/off con brecha diferencial

En este algoritmo se utiliza una estructura con tres casos, comandada mediante un shift register y una estructura llamada select, comparable con una estructura if.

Existen dos límites dentro de este control, el inferior controla la niquelina, y el límite superior la electroválvula.

Se basa en 3 etapas.

- En el primer proceso se compara la temperatura adquirida con el límite inferior; siendo este la temperatura deseada menos uno, dando así una brecha (rango), mientras la temperatura sea menor al límite inferior la niquelina permanecerá encendida; caso contrario ira al segundo proceso.

La electroválvula en esta etapa permanecerá apagada, como se aprecia en la figura 5.27.a

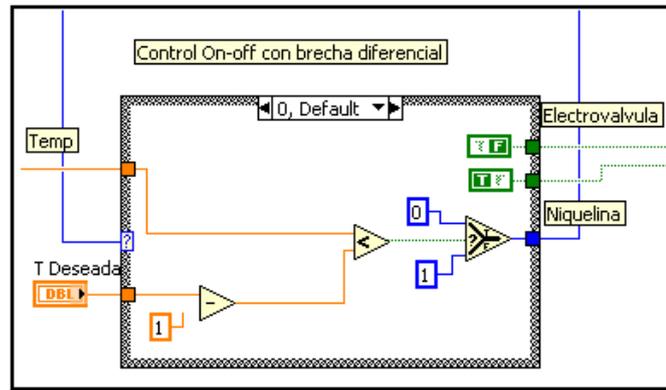


Figura 5.27.a.- Primer proceso del case

- En el segundo proceso se compara la temperatura adquirida con el límite superior, siendo la temperatura deseada más uno, creando así un rango de temperatura, y si existiera alguna señal de ruido que sea menor el límite inferior no regresará al primer proceso y permanecerá en el segundo hasta que la temperatura sea mayor al límite superior, en este caso iría al tercer proceso.
- En este proceso tanto la niquelina como la electroválvula permanecen apagadas, si exceden el límite inferior y superior respectivamente, caso contrario la niquelina se encenderá en este proceso.
- Si la señal luego de un cierto periodo, no llegase a superar el límite superior y descendiera del límite máximo inferior la niquelina empezaría a funcionar, por la razón de que siempre se pierde energía calorífica hacia el ambiente. Este proceso se ilustra en la figura 5.27.b

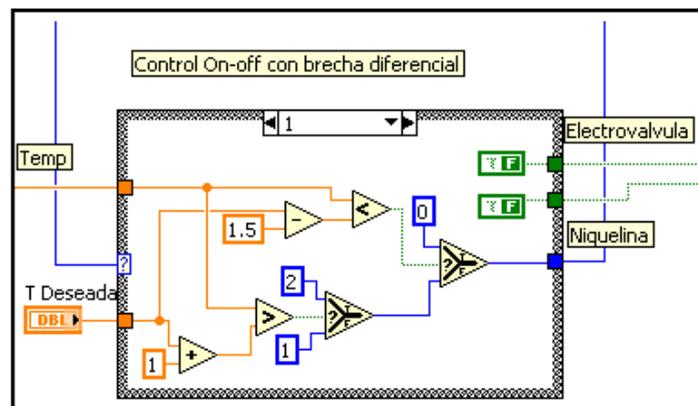


Figura 5.27.b.- Segundo proceso del case

- En el tercer proceso existen dos comparaciones:
 - La primera compara la temperatura adquirida con el límite superior, si es mayor activará la electroválvula, caso contrario se apagará.
 - La segunda compara la temperatura con el límite inferior, si es menor activará la niquelina, caso contrario permanecerá apagada, como se aprecia en la figura 5.27.c

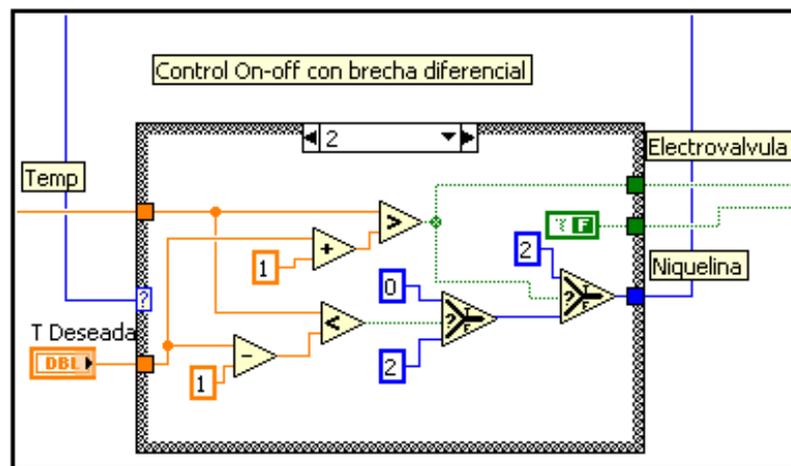


Figura 5.27.c.- Tercer proceso del case

5.4.2 Actuadores

El control de los actuadores se realiza mediante las salidas digitales del DAQ.

5.4.2.1 Configuración de puertos digitales

Para configurar los puertos digitales se emplea un DAQ Assistant, con la finalidad de utilizar un puerto digital creado por el mismo.

Para ingresar los datos en el asistente se debe crear un arreglo booleano; convirtiendo este último en un arreglo numérico utilizando un conversor numérico, el cual es necesario al ingreso del DAQ Assistant, ilustrada en la figura 5.28

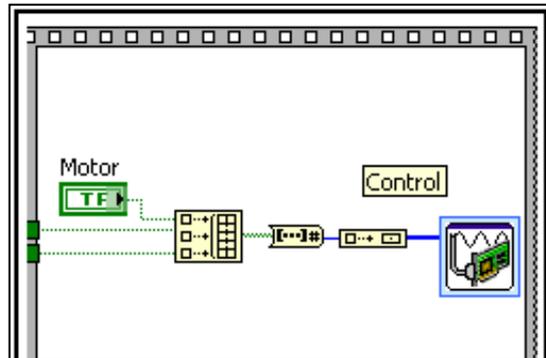


Figura 5.28.- Creación de puertos digitales

5.5 Interface del HMI

El diagrama de flujo presentado en la figura 5.29, es un interface hombre máquina.

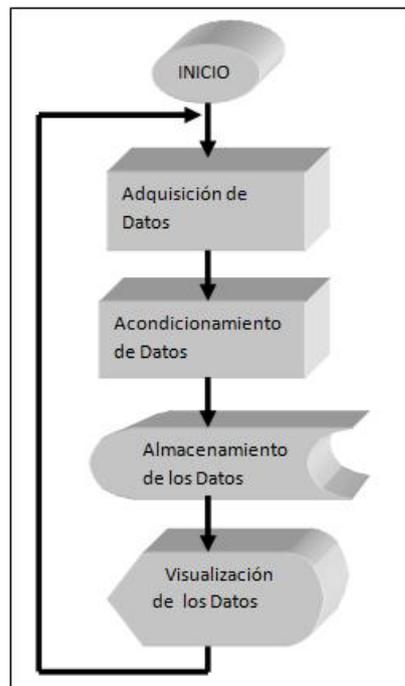


Figura 5.29.- Diagramas de bloques de la programación en LabVIEW

5.5.1 Adquisición de datos

Para el diseño del firmware de control se utilizó una versión 8.2 estudiantil de LabVIEW, por las facilidades para la programación orientada a objetos y manejos de puertos, además nos permite realizar una interface visual sencilla de interpretar y manejar.

LabVIEW brinda la posibilidad de utilizar módulos de adquisición propios de National Instruments.

Para la adquisición de datos se implementaron los siguientes procesos:

5.5.1.1 Creación de los canales analógicos

Se configura como señales que varían entre 0 y 10V, además las señales son referidas a tierra como se muestra en la figura 5-30-a.

Adicionalmente se coloca un controlador con el cual se seleccionará el dispositivo y los canales analógicos que se ocuparán, la selección de los puertos que se van a ocupar en este diseño solo se realiza una vez y es al inicio del programa, como se ilustra en la figura 5.30.a.

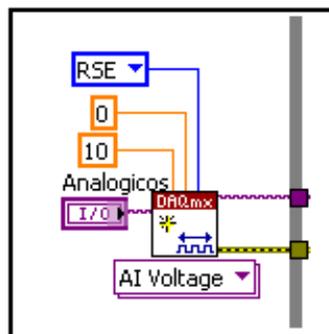


Figura 5.30.a.- Creación de canales

5.5.1.2 Reloj de muestreo

Mediante esta configuración se seleccionará el número de muestras y el período al cual van a ser muestreadas las señales, se puede apreciar en la figura 5.30.b.

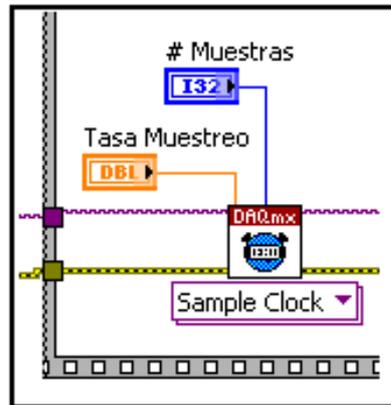


Figura 5.30.b.- Reloj de muestreo

5.5.1.3 Lectura de los datos

La lectura de datos se divide en 3 etapas:

- **Inicio de tarea del DAQ**

En este momento el modulo empieza a recoger los datos

- **Lectura de datos**

Ya que en este proyecto se necesita más de un canal analógico, utilizamos el lector de DAQ, y se configura para leer datos analógicos de 1D con N canales y M muestras.

La salida del lector genera un arreglo de 1D, el cual contiene 100 muestras de cada entrada analógica; estos datos ingresan a un pro mediador el cual

genera un arreglo con los valores promedio de cada entrada analógica, separando los datos obtenidos con un index array para utilizarlos en la visualización.

- **Detener la tarea del DAQ**

En este momento el módulo termina la recolección de datos, el cual es ilustrado en la figura 5.30.c.

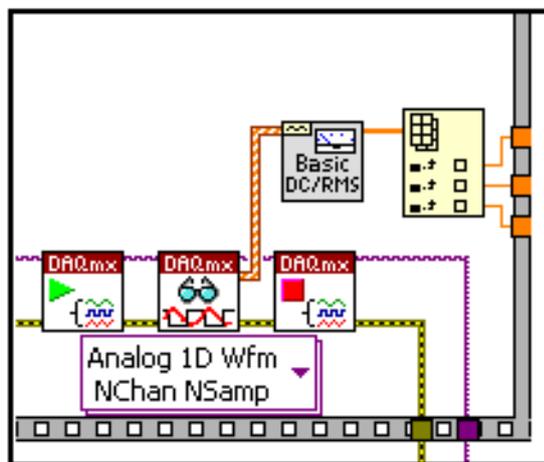


Figura 5.30.c.- Lectura de datos

5.5.1.4 Eliminación de canal

Este paso es importante, ya que se liberan todos los recursos ocupados en la creación del canal, esto solo se realiza una vez al finalizar todo el programa. Como se aprecia en la figura 5.31

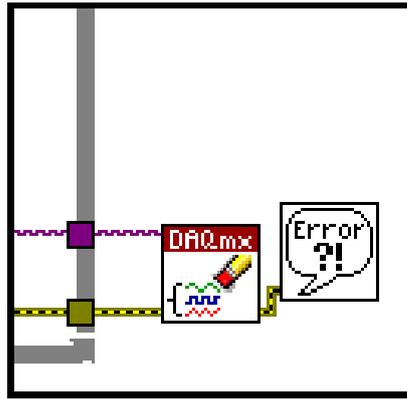


Figura 5.31.- Eliminación de canal

5.5.2 Acondicionamiento de datos

Después de adquirir las señales, se necesitan acondicionarlas para la correcta visualización y el respectivo almacenamiento, siendo LM35DZ y el MPX2200D sensores lineales garantizados, solo se emplea una constante multiplicadora, facilitando así la comprensión de los datos adquiridos.

Debido a que el sensor de pH no es lineal, se empleó una interpolación lineal con los datos obtenidos con los patrones de pH, y se obtuvo una constante multiplicadora y una restadora, como se aprecia en la Figura 5.32

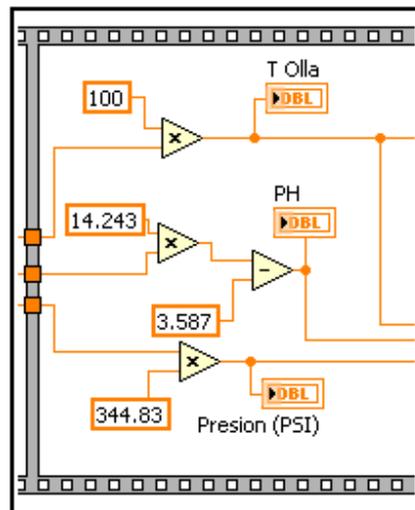


Figura 5.32.- Acondicionamiento de datos

5.5.3 Almacenamiento de datos

Al necesitar el análisis posterior a las pruebas, el almacenamiento se debe a que después, estos datos serán analizados, para dar un mejor control del proceso del producto en cuestión, proceso el cual se aprecia en la figura 5.33.

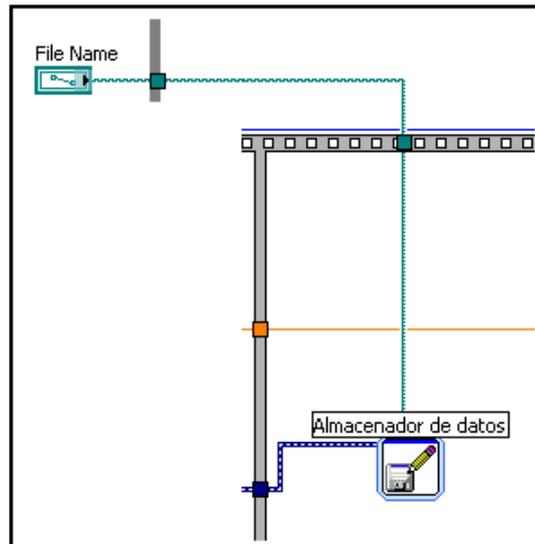


Figura 5.33.- Almacenamiento de datos.

5.5.4 Visualización

Los datos que se obtuvieron en el índice array se los acondiciona con ciertas constantes obtenidas en la calibración de los sensores, estos datos son combinados mediante el icono de merge signals y se visualiza, como se ilustra en la figura 5.34

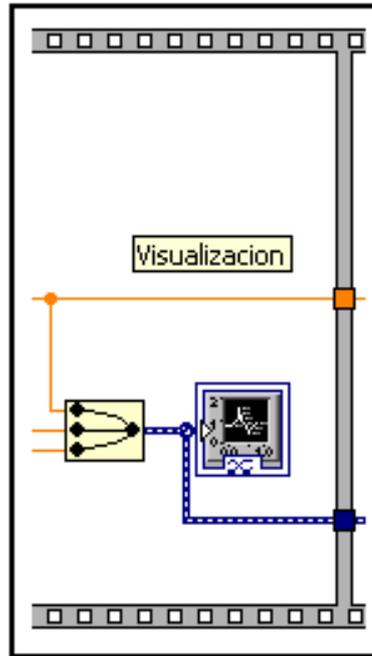


Figura 5.34.-Visualización de datos

5.5.5 Finalización del firmware

Como una medida preventiva, se debe asignar valores de 0 a todo el puerto digital, con este puerto funcionan los actuadores, evitando así que algún actuador siga en funcionamiento, previniendo así un daño futuro del equipo, ilustrado en la figura 5.35

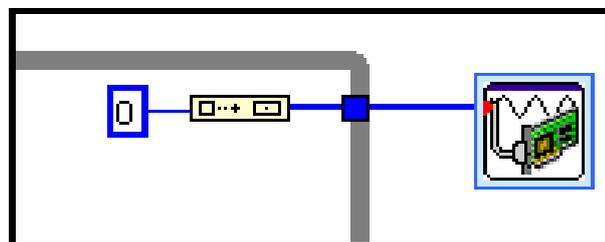


Figura 5.35.- Finalización del firmware

5.5.6 Inicialización del firmware

Previo a la recolección de datos, se debe asegurar que la olla externa este llena de agua, puesto que la falta de agua podría afectar a la niquelina debido a la potencia que esta tiene.

El firmware desplegará una ventana esperando a que el usuario dé su aprobación cuando visualice que el agua ha llegado a un nivel apropiado, este proceso se ilustra en la figura 5.36.



Figura 5.36.- Inicialización del firmware

En la figura 5.37 se ilustra el diagrama de bloques, con todos los procesos detallados anteriormente.

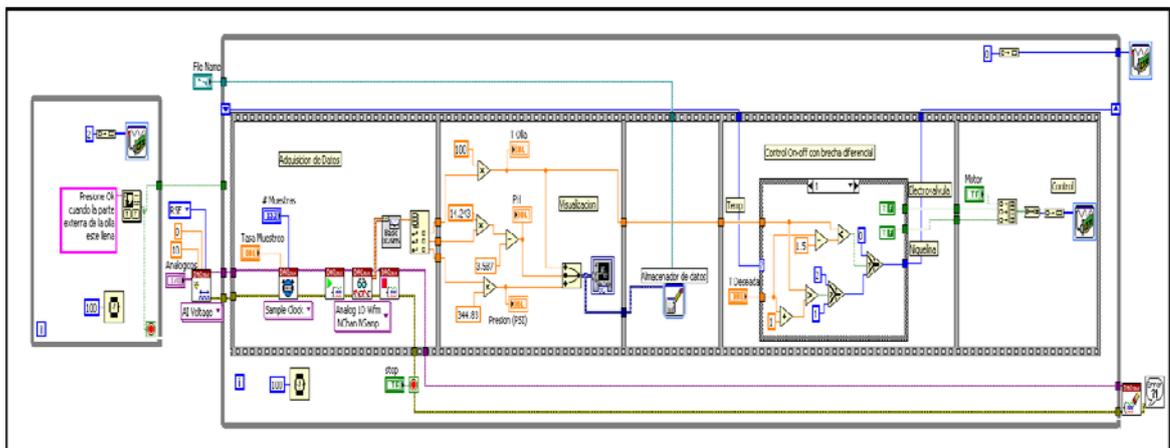


Figura 5.37.- Diagrama de Bloques

Los datos recibidos se visualizaran en una pantalla, verificando así el funcionamiento del biodigestor como se ilustra en la figura 5.38.

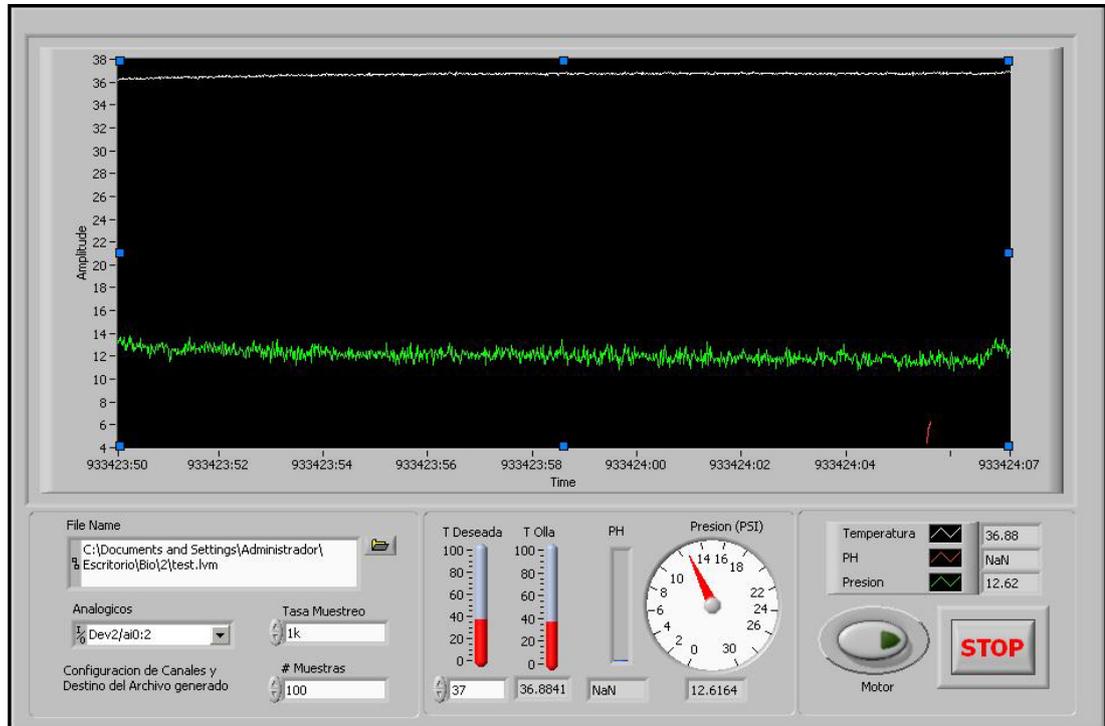


Figura 5.38.- Panel frontal

CAPITULO 6

MÉTODOS Y MATERIALES

6.1 Producción de biogás: Diseño experimental

La producción de biogás mediante la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos utilizando como inóculo excretas y vísceras de animales es influenciada por los siguientes factores:

- Temperatura
- Relación carbono – nitrógeno (C/N)
- pH
- Tipo de inóculo
- Humedad
- Tiempo de permanencia
- Cantidad de oxígeno presente
- Nutrientes presentes
- Presencia de sustancias inhibidoras.

Dentro de los factores nombrados los más representativos son; la temperatura (T^0), el potencial hidronio (pH), el tiempo de permanencia (t. perm.) y el tipo de inóculo que se utiliza. Las otras variables son más complicadas de controlar o pueden ser estandarizadas para la experimentación, tal es el caso de la humedad que puede ser estandarizada para todos los sustratos, o el flujo de oxígeno que no puede ser controlado pero se puede crear total anaerobiosis.

Todas estas variables o factores influirán en el rendimiento de producción de biogás que es la respuesta esperada del proceso. Existen muchos métodos para

cuantificar la producción de biogás pero el utilizado en el presente estudio será la variación de presión medida por un sensor electrónico de presión diferencial.

Con los antecedentes nombrados se puede formar el flujo del diseño experimental (Figura 6.1) así como escoger el tipo de diseño que se utilizara y desarrollar la matriz de experimentación (Tabla 6.1) que se aplicara para planificar la investigación.

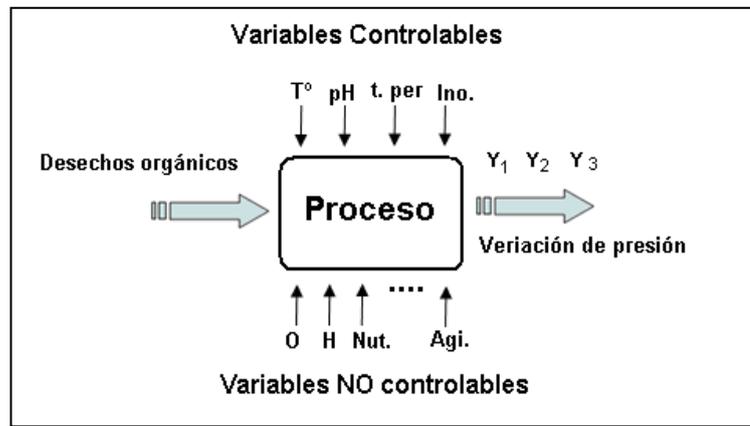


Figura 6.1.- Flujo del diseño experimental para la producción de biogás

Tabla 6.1.- Variables y respuesta del diseño experimental

Nº	Variable	Respuesta
1	Inóculo	Variación De Presión
2	Temperatura	
3	t de permanencia	
4	pH	

El número de variables controlables son 4. Se trabajarán a dos niveles de experimentación: un máximo (+1) y un mínimo (-1), como respuesta se medirá la variación de presión final. El diseño que se aplicara será 2^k en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2.- Matriz experimental 2⁴ para biogás

Nº	Inóculo	Temperatura	t. de per	pH
1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1
3	-1	+1	-1	-1
4	+1	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	-1
6	+1	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1	-1
9	-1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1
11	-1	+1	-1	+1
12	+1	+1	-1	+1
13	-1	-1	+1	+1
14	+1	-1	+1	+1
15	-1	+1	+1	+1
16	+1	+1	+1	+1

6.2 Biodigestores de experimentación

Para efectuar los experimentos mediante los cuales se determinarán las mejores condiciones para la producción de biogás a partir de desechos orgánicos, es necesaria la construcción de equipos digestores de laboratorio, en los cuales se puedan dar y controlar los parámetros con los que se desarrollarán dichos experimentos.

Además para el control de la temperatura necesaria en la experimentación, se dispuso de un baño María controlado por un termostato, el cual proporcionaría la cantidad de calor necesaria para ejecutar dichos experimentos. El programa informático utilizado para el control y proceso de datos es LabVIEW de la empresa National Instruments.

6.2.1 Construcción de un biodigestor de experimentación

Los biodigestores para experimentación han sido elaborados en recipientes de vidrio con sus respectivas tapas plásticas de cierre hermético, en los cuales se acoplaron los distintos sensores y se dieron las características necesarias para su empleo y control. Los materiales utilizados para la construcción de un biodigestor de experimentación se listan a continuación.

- Envase de vidrio con tapa plástica hermética de altura: 16,7cm, diámetro: 10cm y grosor: 0,3cm. Volumen total: 1000cm³.
- Cinta de teflón.
- Tapones de goma de Ø=1cm.
- Manguera semi rígida transparente de Ø= 0,6cm.
- Pinzas Hoffman.
- Manguera de venoclisis.

Después de conseguidos los materiales se procedió a la construcción de cada uno de los equipos biodigestores de experimentación como se explica.

En la tapa de cada recipiente se realizan tres agujeros de 1 cm de diámetro, en los cuales se colocarán los tapones de caucho. Fotografía 6.1.



Fotografía 6.1.- Tapón de goma colocado en la tapa de uno de los recipientes

Cada uno de los tapones es perforado para la colocación del sensor de presión, el sensor de temperatura y la manguera de venoclisis que servirá para la toma de muestras de gas generado. Todo es unido y sellado a la tapa mediante pegamento, ver Fotografía 6.2.



Fotografía 6.2.- Tapa del biodigestor con los sensores de presión y temperatura montados

En la Figura 6.2 se puede observar el esquema de la tapa de un biodigestor de experimentación con los sensores ya montados, su respectivo cableado y la manguera de venoclisis por donde se tomarán muestras del gas generado.

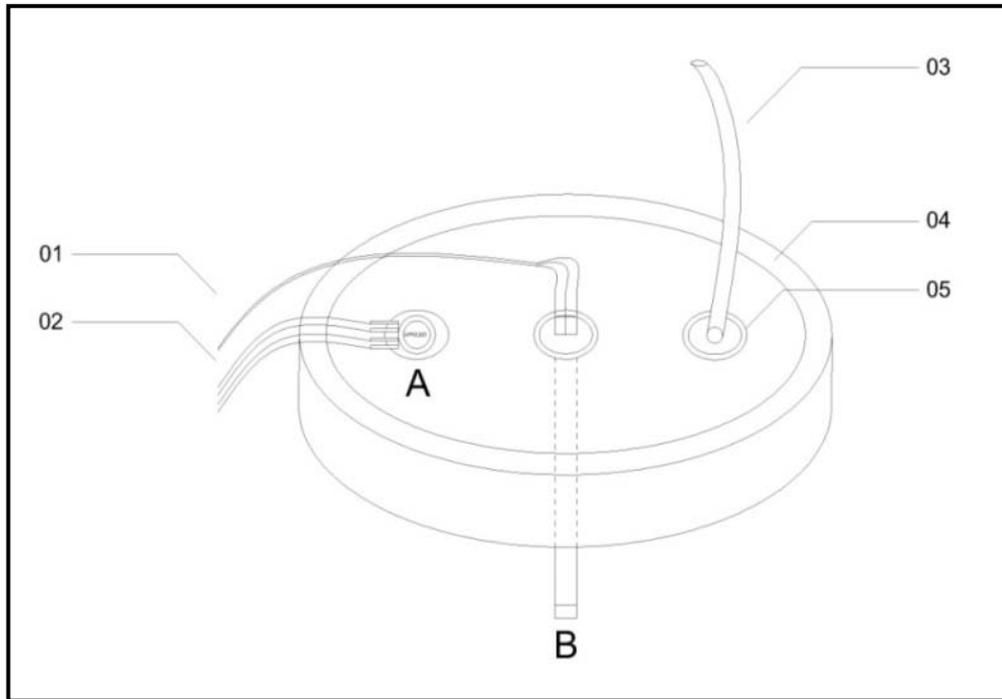


Figura 6.2.- Esquema del montaje de sensores y venoclisis

A Sensor electrónico de presión Motorola® MPX220D

B Sensor de temperatura Im35

01 Conexiones del sensor de temperatura

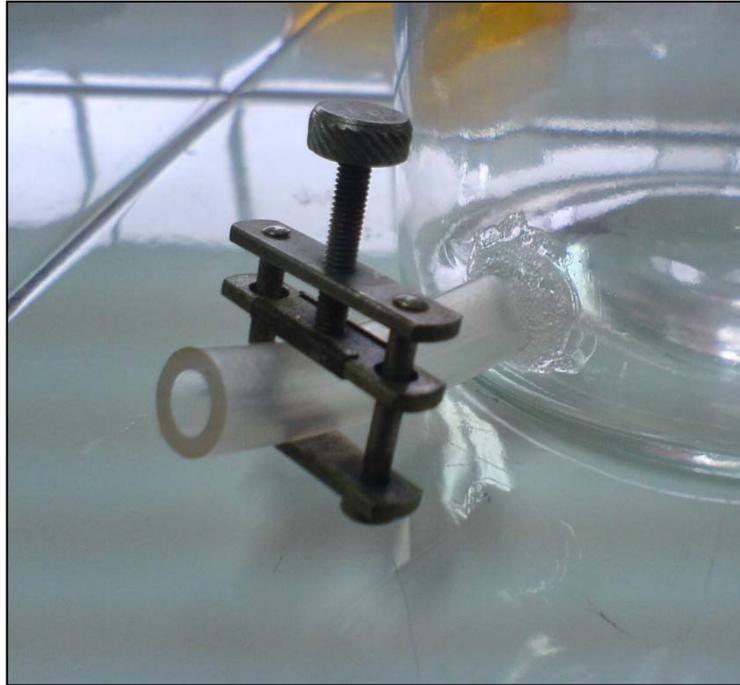
02 Cableado del sensor de presión

03 Manguera de venoclisis para toma de muestras de biogás

04 Empaque de goma aislante de la tapa

05 Tapones de goma aislantes

En la parte inferior de los envases de vidrio también se perfora un agujero y se une con pegamento la manguera de 0,6cm de diámetro y se sella finalmente con la pinza Hoffman, esta servirá para la toma de muestras de materia orgánica fermentada. Fotografía 6.3.



Fotografía 6.3.- Detalle del biodigestor con la toma de muestras añadida en su parte inferior y sellada mediante una pinza Hoffman

En los sensores de presión y temperatura se sueldan sus respectivos cableados que irán conectados a la tarjeta de adquisición de datos DAQ (Figura 6.3), la cual mediante una conexión USB enviará señales de la computadora hacia el termostato y recibirá igualmente señales precedentes de los sensores montados en los biodigestores a través del panel de control programado con LabVIEW®.



Figura 6.3. - DAQ NATIONAL INSTRUMENTS USB 6008

Fuente: National instruments, Modulo de Adquisición USB 6008, <http://www.ni.com>. 2009

La figura 6.4 muestra el esquema de un biodigestor con todas sus partes montadas, los sensores en sus respectivos lugares y listos para ser utilizados.

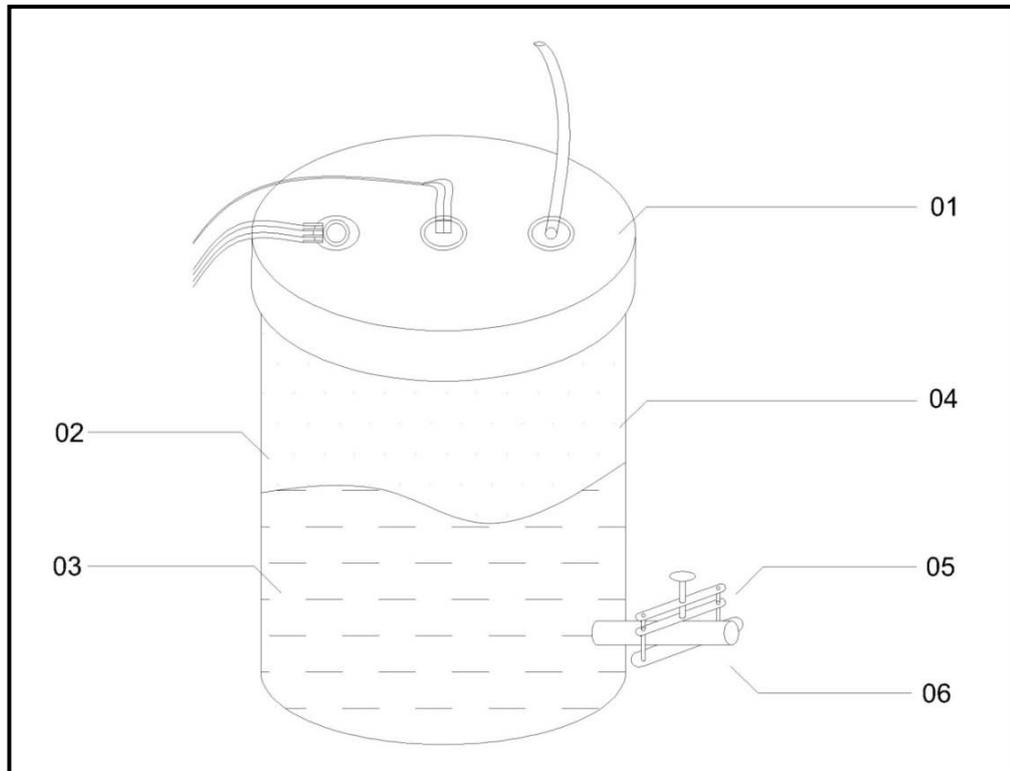


Figura 6.4.- Esquema de un biodigestor para la experimentación

- 01 Tapa con los sensores y venoclisis montados y sellados
- 02 Cuerpo del biodigestor
- 03 Materia orgánica a fermentar
- 04 Espacio para acumulación de biogás generado
- 05 Pinzas Hoffman para sellar la salida de toma de muestras de efluentes
- 06 Manguera para toma de efluentes

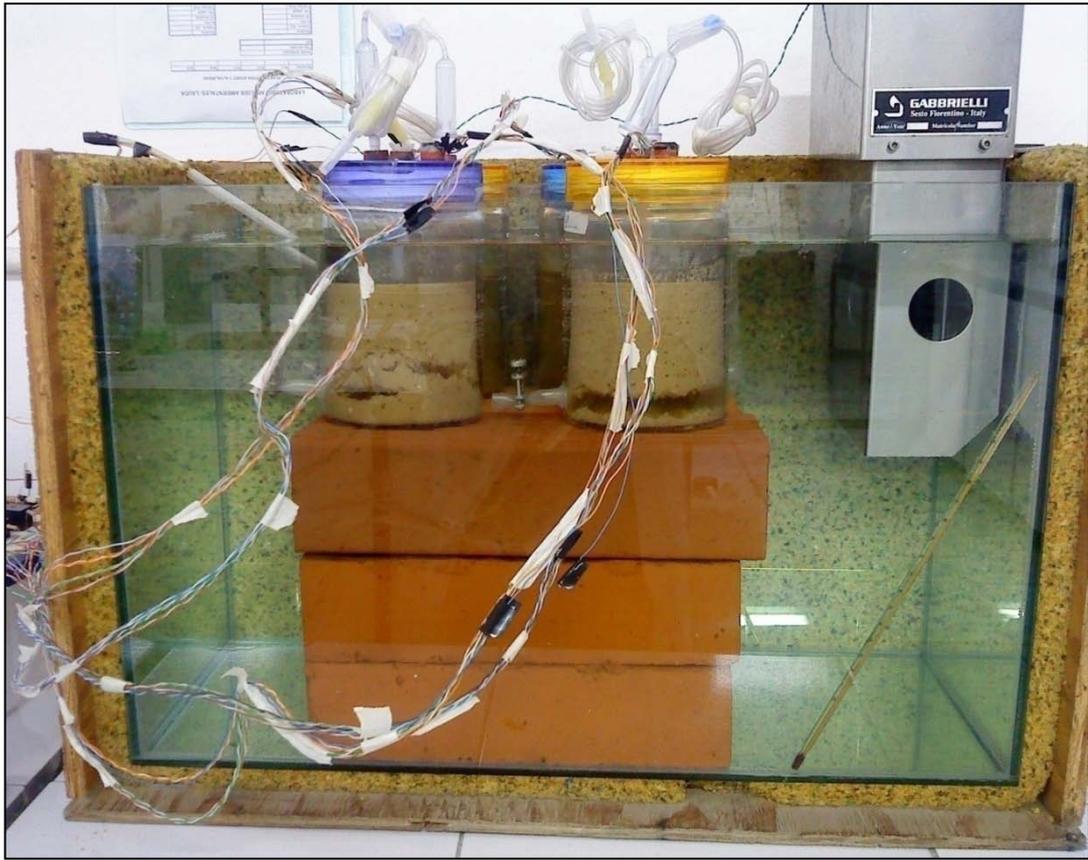
La imagen de un biodigestor ya funcionando para experimentación se observa en la Fotografía 6.4, se puede ver en su interior la materia orgánica en proceso de fermentación.



Fotografía 6.4.- Biodigestor con materia orgánica

6.3 Baño maría

El baño María (Fotografía 6.5) está formado por un contenedor paralelepípedo de vidrio de 60cm de ancho, 40cm de alto y 30cm de profundidad y 0,5cm de grosor de cada panel de vidrio, del cual cuatro de sus seis caras están cubiertas por esponja de poliuretano como aislante térmico y montadas sobre cuatro paneles de madera enchapada.



Fotografía 6.5.- Baño María con los biodigestores inmersos en él.

En su parte superior se encuentra el termostato eléctrico de gas (Fotografía 6.6), responsable de calentar el agua a la temperatura necesaria para cada uno de los experimentos y mantenerla así. Este termostato estaba controlado por el software LabVIEW.

A temperatura ambiente el agua del baño María tenía una media de 18°C y se llenaba de agua hasta el nivel donde se encuentra el termostato.



Fotografía 6.6.- Biodigestores funcionando y termostato.

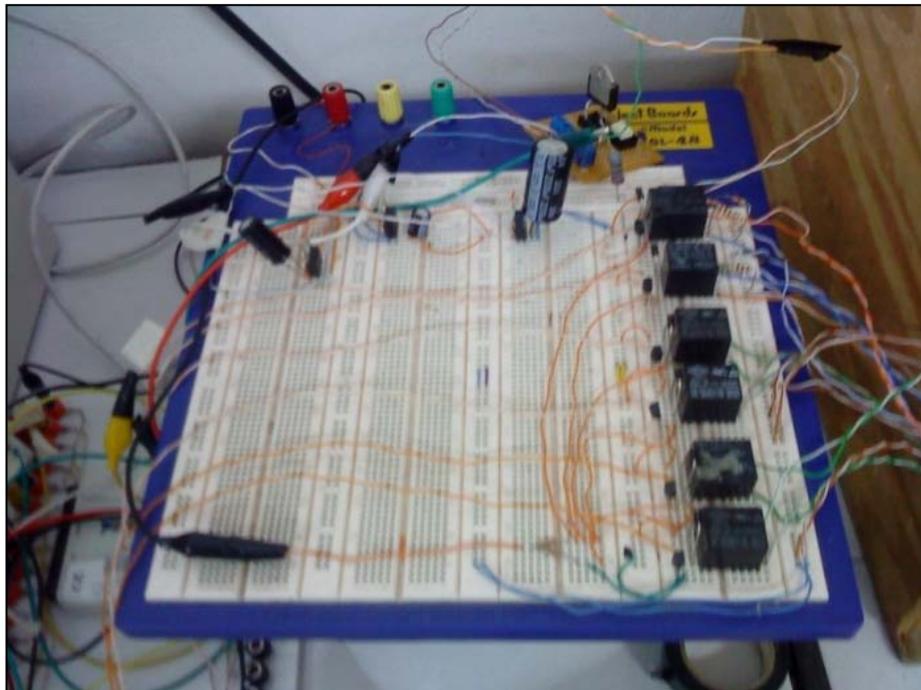
6.4 Conexiones

La recopilación de datos se realizó mediante conexiones a una tarjeta que daban las señales de los sensores de presión y temperatura a la tarjeta de adquisición de datos y configuración del programa de control de datos LabVIEW®. Los materiales necesarios para las conexiones electrónicas y eléctricas se encuentran en la lista a continuación.

- Sensor de presión electrónico Motorola mpx2200D
- Sensor de temperatura electrónico lm35
- Protoboard
- Regulador de tensión 78-12
- Operacionales TL-082
- 1 Relé de 12 V
- 1 Transistor

- 1 Diodo
- 1 Resistencia 330 Ohmios
- Cable multipar
- 1 Triack
- 1 Condensador de 2200 faradios

En la fotografía 6.7 se observa el protoboard con todos dispositivos electrónicos necesarios para la recepción y envío de señales digitales de los sensores electrónicos.



Fotografía 6.7.- Protoboard y las conexiones de los distintos dispositivos electrónicos.

6.5 Preparación de los experimentos de biodigestión

A continuación se explicara los pasos para la preparación de los experimentos.

6.5.1 Composición de la materia orgánica a fermentar

La materia orgánica a fermentar fue recogida en el mercado de la ciudad de Cuenca “El Arenal” de los depósitos de basura orgánica, estos restos corresponden a vegetales y frutas en proceso de descomposición. Fotografía 6.8.



Fotografía 6.8.- Bolsa conteniendo desperdicios orgánicos recogidos

Después de pesadas las cantidades de cada componente necesarias para conformar la materia orgánica, estas fueron trituradas a tal punto de tener la textura de una masa espesa, con el fin de aumentar el área de exposición de esta materia orgánica con los microorganismos. En cada uno de los experimentos realizados se utilizaron siempre las mismas materias orgánicas, exactamente en las mismas proporciones.

La composición de la materia orgánica utilizada en cada uno de los experimentos puede ser observada en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3.- Composición y porcentajes de materia orgánica a fermentar

Mezcla de MP:	%	(g)
Pimiento:	9,09	45,45
Plátano:	9,09	45,45
Frutilla:	9,09	45,45
Tomate:	9,09	45,45
Papa:	9,09	45,45
Col:	9,09	45,45
Maracuyá:	9,09	45,45
C de Choclos:	9,09	45,45
C de Arvejas:	9,09	45,45
MIX de hojas verdes:	18,18	90,90
TOTAL:	100	500

6.5.2 Análisis químico de la materia orgánica

Al analizar la mezcla de la materia orgánica, mediante la técnica de desecado para la obtención del contenido de humedad y sólidos totales y la técnica de Kjeldahl para el contenido de nitrógeno total, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Nitrógeno total N₂: 3422ppm o 0,34225%.
- Humedad: 86, 0584%
- Cenizas: 0,4256%
- Carbono: 13, 5159%

6.5.3 Relación carbón – nitrógeno (C/N)

Es el producto de los porcentajes de Carbono para el Nitrógeno contenidos en la muestra. En el caso de la materia orgánica con la que se trabajó esta relación fue:

C/N: 39:1, estando dentro de los parámetros necesarios para una buena fermentación.

Tabla 6.4.- Relación Carbono: Nitrógeno de diversos desechos disponibles.

Material	% N (base seca)	% C (base seca)	C:N
Desechos Animales			
Bovinos	1.7	30.6	18:1
Equinos	2.3	57.6	25:1
Ovinos	3.8	83.6	22:1
Porcinos	3.8	76.0	20:1
Aves	6.3	50.0	8:1
Excretas humanas	0.85	2.5	3:1
Desechos Vegetales			
Paja de trigo	0.53	46.0	87:1
Paja de arroz	0.63	42.0	67:1
Rastrojo de maíz	0.75	40.0	53:1
Hojas secas	1.00	41.0	41:1
Rastrojo de soya	1.30	41.0	32:1

6.5.4 Cantidad de agua añadida a la materia orgánica

De acuerdo a la cantidad de los sólidos totales contenidos en la materia a fermentar, se añadió agua en relación **1:1** (Zabala, 2009), para completa la humedad requerida para el proceso.

6.5.5 Control del pH de la materia orgánica

De acuerdo a los parámetros de experimentación, cada uno de ellos debe mantener un determinado pH en el proceso de fermentación, por lo cual se formularon tres soluciones Buffer de pH 6,7 y 8 respectivamente, que servirán para control de cada uno de los experimentos.

6.5.6 Preparación y llenado de los biodigestores

La materia orgánica junto con el inóculo y el agua necesarias, son introducidas en el biodigestor hasta ocupar el 50% del volumen total, en este caso 500cc en el recipiente de 1000cc.

Se sella herméticamente el frasco con la ayuda de la cinta de teflón y se introduce lentamente en el baño María, con cuidado de no dañar ninguna de las conexiones de los sensores electrónicos y con la precaución de que la mayor parte del recipiente esté inmersa en el agua. Se fijan los recipientes a la base del baño María y se arranca el programa de control de datos. El primer dato de presión tomado será aquel que coincida con el de la temperatura establecida para el desarrollo de un experimento dado.

Se emplearon dos tipos distintos de inóculos en los ensayos excremento de cerdo (*Sus scrofa domestica*) e Intestinos de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), los cuales se mezclaron en relación del 15% del total de la materia orgánica a fermentar (Cardona, 2004).

6.6 Tabulación, ordenamiento e interpretación de datos

Después de culminados los experimentos, todos los datos obtenidos por los sensores son almacenados en el disco duro de la computadora. A estos datos son necesarios ordenarlos, tabularlos e interpretarlos para conocer los resultados de cada uno de los experimentos.

6.6.1 Toma de datos proporcionados por los sensores electrónicos

Al correr el programa de adquisición de datos, en primer lugar, en el monitor de controles LabVIEW® podemos fijar la temperatura a la que se desee realizar determinado experimento con el control del termostato, en nuestro caso a 37°C y 50°C. A 18°C no es necesario encender el termostato puesto que es la temperatura ambiente del agua en la ciudad de Cuenca. Al llegar a la temperatura deseada, automáticamente el calefactor se apaga, para volver a encenderse si la temperatura ha disminuido del límite necesario para cada experimento.

Gracias a la tarjeta de adquisición de datos DAQ, todas las señales electrónicas provenientes de los sensores instalados en los biodigestores son recolectadas y procesadas por la computadora, pudiendo ser estas visibles en su monitor a través de curvas (Ver Figura 6.5), la cual muestra tanto la temperatura en el dentro del recinto, así como la presión generada debido a la producción de gases en su interior. Todos estos datos son almacenados por la computadora para su posterior análisis.

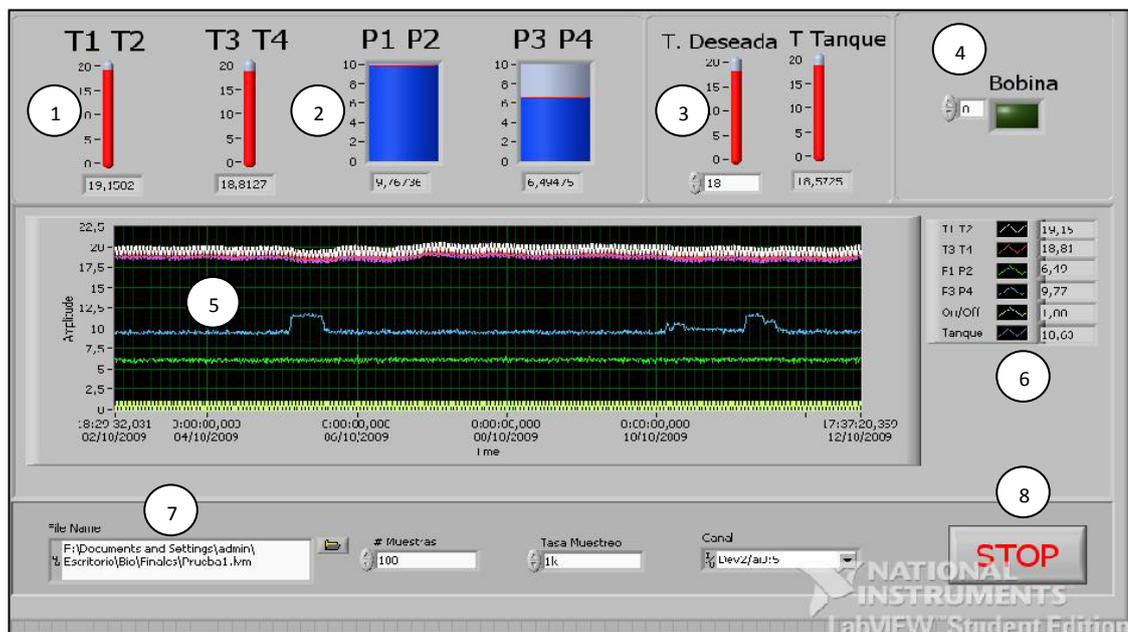


Figura 6.5.- Panel de control LabVIEW®

- 01 Indicador de temperatura de los biodigestores.
- 02 Indicador de presión de los biodigestores.
- 03 Control e indicador de temperatura del balo María.
- 04 Relé en funcionamiento (1/3 o 2/4).
- 05 Curvas indicadores de variación de señales de los sensores.
- 06 Datos numéricos de las señales de los sensores.
- 07 Dirección de la carpeta donde se almacenan los datos obtenidos.
- 08 Parada de emergencia.

6.6.2 Tabulación y lectura de datos

Después de transcurrido el tiempo de retención de cada uno de los experimentos, los datos almacenados provenientes de los sensores electrónicos de presión y temperatura, son analizados como se puede ver en la figura 6.6, en una hoja de cálculo Excel®.

	A	B	C	D	E	F	G
1	LabVIEW Measurement						
2	Writer_Version	0.92					
3	Reader_Version	1					
4	Separator	Tab					
5	Multi_Headings	No					
6	X_Columns	One					
7	Time_Pref	Absolute					
8	Operator	admin					
9	Date	08/01/2010					
10	Time	59:15,9					
11	***End_of_Header***						
12							
13	Channels	5					
14	Samples	1	1	1	1	1	
15	Date	08/01/2010	08/01/2010	08/01/2010	08/01/2010	08/01/2010	
16	Time	59:15,9	59:15,9	59:15,9	59:15,9	59:15,9	
17	X_Dimension	Time	Time	Time	Time	Time	
18	X0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000000E+0
19	Delta_X	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	
20	***End_of_Header***						
21	X_Value	Untitled	Untitled 1	Untitled 2	Untitled 3	Untitled 4	Comment
22	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
23	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000.000	
24	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
25	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000.000	
26	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
27	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000.000	

Figura 6.6.- Interpretación de los datos recogidos y tabulados en Excel®

- 01 Fecha y hora de la toma de datos.
- 02 Numero de señales recibidas.
- 03 Temperatura del baño María.
- 04 Temperatura del biodigestor 1 ó 3.
- 05 Presión del biodigestor 1 ó 3.
- 06 Temperatura del biodigestor 2 ó 4.
- 07 Presión del biodigestor 2 ó 4.
- 08 Indicador de biodigestores 0.000: 1 ó 2, 1.000: 3 ó 4.

Los datos están expresados en mili Voltios (mV) (Figura 6.7). Para los sensores de temperatura cada mV representa 1° centígrado; para los sensores de presión cada unida de mV ha sido multiplicada 2000 veces para poder ser legible y cada mV representa un incremento de 5kPa de acuerdo a la Figura 6.8.

	A	B	C	D	E	F	G
15	Date	17/04/2010	17/04/2010	17/04/2010	17/04/2010	17/04/2010	17/04/2010
16	Time	06:00	06:00	06:00	06:00	06:00	06:00
17	X_Dimension	Time	Time	Time	Time	Time	Time
18	X0	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
19	Delta_X	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
20	***End_of_Header***						
21	X_Value	Untitled	Untitled 1	Untitled 2	Untitled 3	Untitled 4	Comment
22		21103,272	22026,241	8040,272	21753,554	21103,272	1000000
23		21412,695	22064,509	8065,773	21409,491	21412,695	0.000000
24		39036,971	22317,694	8040,229	21727,933	39036,971	1000000
25		43092,703	22573,354	8137,305	22214,239	43092,703	0.000000
26		42660,534	22938,948	8137,283	22633,801	42660,534	1000000
27		42652,863	23570,429	8162,874	23664,549	42652,863	0.000000
28		42514,774	24181,457	8065,726	23830,545	42514,774	1000000
29		42744,922	24956,108	7984,021	24976,198	42744,922	0.000000
30		42785,838	25845,806	8142,417	25965,689	42785,838	1000000
31		42867,668	26681,815	7937,964	25936,105	42867,668	0.000000
32		42995,529	27717,204	8019,754	27243,389	42995,529	1000000
33		43115,717	28714,315	7963,531	28735,335	43115,717	0.000000
34		43223,102	29690,937	8147,506	29312,708	43223,12	1000000

Figura 6.7.- Datos recogidos en un experimento y tabulados en Excel®

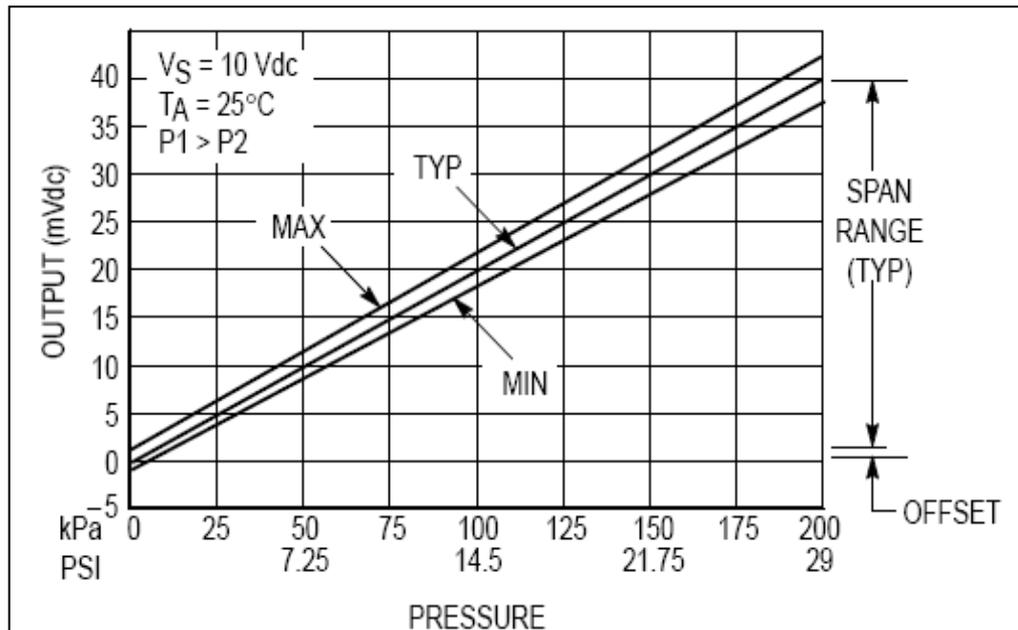


Figura 6.8.- Curva para la conversión de unidades de los datos recogidos por el sensor de presión Motorola® MPX220D

Fuente: Motorola, Curva para la conversión de unidades, <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/motorola/MPX2200D.pdf>. 1997

Se tomó un dato de presión, temperatura y temperatura del baño María cada 30 minutos. Así que si el tiempo de retención de un experimento es de 30 días se obtendrían $2 \times 24 \times 30 = 1440$ de cada uno de los sensores; al ser 9, 4 de presión, 4 de temperatura y 1 del baño María se obtendrían $1440 \times 9 = 12960$ datos en total listos para ser tabulados. En la Figura 6.9 se observan los datos ya transformados a sus respectivas unidades en una hoja de cálculo Excel®

	A	B	C	D	E	F
1						
2						
3	°C	kPa	°C	kPa	°C	
4	Temp BM	Presión1	Temp1	Presión2	Temp2	
5	21,10	56,07	22,03	20,10	21,75	0
6	21,41	56,14	22,06	20,16	21,41	1
7	39,04	56,45	22,32	20,10	21,73	0
8	43,09	57,18	22,57	20,34	22,21	1
9	42,66	58,72	22,94	20,34	22,63	0
10	42,65	73,55	23,57	20,41	23,66	1
11	42,51	71,75	24,18	20,16	23,83	0
12	42,74	60,59	24,96	19,96	24,98	1
13	42,79	75,99	25,85	20,36	25,97	0
14	42,87	66,56	26,68	19,84	25,94	1
15	43,00	62,85	27,72	20,05	27,24	0
16	43,12	67,73	28,71	19,91	28,74	1
17	43,22	63,88	29,69	20,37	29,31	0
18	43,34	67,74	30,64	20,37	30,31	1
19	43,39	62,15	31,50	20,19	30,86	0
20	43,68	56,02	32,46	19,82	32,54	1

Figura 6.9.- Datos recogidos por los sensores electrónicos y convertidos a sus correspondientes unidades en una hoja de Excel®

Para evitar el manejo de un gran número de valores, se procedió a tomar una media aritmética con los datos correspondientes a cada uno de los días de experimentación. Así, tomando el ejemplo anterior, se tenían por cada sensor 1440 datos en 30 días. Al tomar un número de datos por cada día tenemos $1440 \div 30 = 40$ datos, con los cuales se procede a obtener una media aritmética con un rango de valores de 40 en 40 unidades; obteniendo así 30 datos en total, uno por cada día que requiera un determinado experimento.

De los datos generados por los sensores, no todos son utilizables, debido a que están completamente fuera de los rangos requeridos para un proceso, esto es debido al ruido electrónico generado por otros aparatos eléctricos o por bajones o subidas de tensión en los distintos equipos digitales. Estos datos son retirados del análisis

Conseguidos de esta manera los datos necesarios, se procede a trazar una gráfica con la cual poder expresar la variación de presión en el interior de un biodigestor, y por consiguiente si hubo o no producción de biogás y el momento en el cual este se deja de producir. En la Figura 6.20 se puede apreciar una curva dibujada a partir de los datos de tiempo y presión obtenidos mediante experimentación.



Figura 6.10.- Grafica de la variación de presión por el tiempo transcurrido en días

6.7 Análisis y determinaciones químicas de la materia orgánica a fermentar

Antes de ser cargados los biodigestores para comenzar cada experimento, la materia prima debe ser analizada para conocer los valores iniciales de humedad y sólidos totales, así como nitrógeno total para conocer su relación carbono-nitrógeno para contar con datos que sirvan para una comparación posterior con la materia ya fermentada al final de cada experimentación.

6.7.1 Determinación de materia orgánica consumida del sustrato

El sustrato que se va a utilizar para la fermentación es sometido a un análisis de cenizas inicial, para saber el contenido de materia orgánica que está entrando en el biodigestor. Se hará lo mismo con el residuo proveniente de la fermentación, y se hará el cálculo para determinar el contenido de materia orgánica consumida en el proceso, este dato nos servirá para conocer con cuál de las condiciones controladas se logra una mayor descomposición del sustrato empleado.

Donde: MOC es el contenido de materia orgánica consumido del sustrato por el biodigestor. S_1 , el peso de sustrato inicial antes de la entrada al digestor; c_1 , es la cantidad de cenizas después de la calcinación de S_1 . S_2 , el peso del residuo después de la fermentación; c_2 , es la cantidad de cenizas después de la calcinación de S_2 .

A continuación se listan los materiales necesarios para la técnica de la determinación de contenido de humedad, sólidos totales y porcentaje de cenizas en una muestra.

- Mufla
- Capsulas de porcelana
- Balanza analítica

Los pasos a seguir para realizar esta técnica se encuentran en la lista a continuación.

- Secar capsula a 103°C por 15' y pesar.
- Pesar muestra alrededor de 5g.
- Colocar en la estufa a 105°C por 3 horas, enfriar y pesar.
- Colocar la capsula, en la mufla a 500°C, de 2 horas.

Para su correspondiente cálculo se pueden ver en las fórmulas Ec. 6.1 y Ec. 6.2.
En donde:

- m_4 = cápsula + muestra desecada
- m_1 = cápsula vacía
- m_2 = cápsula + muestra

$$\%ST = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100$$

Ec. 6.1.- Fórmula para el cálculo de sólidos totales

$$\%Cenizas = \frac{m_4 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100$$

Ec. 6.2.- Fórmula para el cálculo de porcentaje de cenizas

6.7.2 Determinación de Nitrógeno total

La cantidad de nitrógeno total encontrada en la materia orgánica que entrará en el proceso, servirá para encontrar la relación carbono-nitrógeno (C-N) necesaria para conocer si esta materia es apta o no para una correcta fermentación.

Método de Kjeldahl. Esta determinación se basa en la transformación del nitrógeno contenido en la muestra en sulfato de amonio mediante la digestión con ácido sulfúrico en presencia de un catalizador. El ion amonio obtenido se transforma en medio básico en amoníaco que se destila y valora con una solución de ácido patrón o se lo determina directamente mediante espectrofotometría ultravioleta. A continuación la lista de materiales y reactivos necesarios para esta técnica.

- Balanza analítica
- Tubos de digestión
- Hornilla eléctrica
- Aspirador de gases
- Pipetas
- Tubos de ensayo
- Ácido sulfúrico al 96%
- Esquirlas de silicatos (catalizador)
- Agua destilada

Se empieza la determinación, primeramente pesando con precisión de 0.1mg, 2.5g de muestra desecada a 105°C por 24 horas y colocarla en el tubo digestor Kjeldahl. A continuación verter lentamente 25cc del ácido sulfúrico y 0,5g de esquirlas de silicato, la mezcla se torna de color oscuro. Aforar con agua destilada a 50cc.

Concluido esto, se colocan los tubos digestores con la mezcla sobre las hornillas eléctricas y se empieza la digestión a alta temperatura por 3 o 4 días hasta que la mezcla sea completamente transparente.

Después de finalizado este proceso, se toman alícuotas y se disuelven con agua destilada en relación 1:10 en tubos de ensayo. Con las muestras diluidas se procede al análisis espectrofotométrico. Con lo cual se obtiene el valor del contenido de nitrógeno total de la muestra en partes por millón.

6.7.3 Determinación de metano

Se realiza para establecer la composición del biogás en cuanto a la cantidad de Metano y CO₂. La técnica consiste en la determinación indirecta del metano, puesto que esta técnica busca el contenido de CO₂ en una muestra y por diferencia de volúmenes se puede conocer la cantidad de metano requerida. Lista de materiales y reactivos para la realización de esta técnica.

- Probeta de 50ml
- Vaso de precipitación de 250ml.
- Jeringuilla de 50ml
- Tapón de corcho
- Hidróxido de Sodio

Se comienza por añadir 50mm de NaOH a la probeta y se voltea colocándole en un vaso al cual se le adiciona 100ml de sosa para evitar la entrada de oxígeno. El corcho se coloca en la válvula de esfera i se introduce la jeringuilla en el mismo procediéndose a abrir la válvula para dejar salir el gas.

Una vez tomada la muestra de gas se deposita en el vaso y se presiona el émbolo para que comience a burbujear. Este método consiste en determinar el porcentaje de metano mediante el desplazamiento de biogás en la probeta.

Luego de determinados minutos se llega a estabilizar y se procede a la lectura del contenido de CO₂ en el porcentaje respectivo, presentándose además como residuos blanquecinos que se depositan en la pared del vaso. La lectura se hace directamente por diferencia de volúmenes.

6.7.4 Determinación de metano mediante cromatografía

La cromatografía es un método físico de separación en el cual los componentes a separar se distribuyen entre dos fases, una de las cuales constituye la fase estacionaria, de gran área superficial, y la otra es un fluido (fase móvil) que pasa a través o a lo largo de la fase estacionaria (Keulemans,1959).

La fase estacionaria puede ser un sólido o un líquido dispuesto sobre un sólido que actúa como soporte, de gran área superficial. La fase móvil es un fluido (puede ser gas, líquido o fluido supercrítico) que se usa como portador de la mezcla. En la

cromatografía ocurren dos fenómenos muy importantes y que son prácticamente los rectores del proceso de separación: la adsorción y la absorción.

La adsorción es la retención de una especie química en los sitios activos de la superficie de un sólido, quedando delimitado el fenómeno a la superficie que separa las fases o superficie interfacial. La absorción es la retención de una especie química por parte de una masa y depende de la tendencia que tiene ésta a formar mezcla o reaccionar químicamente con la misma.

Esta retención superficial puede ser física o química. La adsorción depende de la naturaleza de la sustancia adsorbida, de la temperatura, de la naturaleza y estado de subdivisión del adsorbente, y de la concentración.

6.7.4.1 Cromatografía de gases como método de separación y análisis

Principios. Separación por la múltiple distribución de una muestra entre dos fases, una de las cuales es una fase móvil gaseosa, y la otra una fase estacionaria sea sólida o líquida. Detección de los componentes separados del efluente que abandona la columna de separación, por la generación de una concentración o flujo de masa, por sus señales eléctricas utilizando detectores específicos y no específicos.

Análisis cualitativos con cromatografía de gases. Determinación de componentes conocidos y/o desconocidos mediante comparación de datos de retención y respuesta (intensidad), obtenidos del cromatógrafo después de su separación con suficiente resolución, este último logra eficiencia y selectividad en la separación, así también lo hace el uso de detectores específicos.

Análisis cuantitativos con cromatografía de gases. Determinación de componentes conocidos o cromatológicamente característicos empleando preferiblemente detectores no específicos, con alta o adecuada precisión y exactitud. Identificación

y determinación de los componentes de una muestra, los cuales se encuentran en muy bajas concentraciones (trazas) con muy bajos límites de detección, utilizando preferiblemente detectores específicos.

Preparativos para la cromatografía de gases. Separación y consiguiente aislamiento de cantidades muy pequeñas o muy grandes de compuestos puros separados. Compuestos puros o enriquecidos pueden ser utilizados para la calibración de una cromatografía cuantitativa, para la identificación mediante métodos espectroscópicos o en síntesis orgánicas.

Uno de los puntos a considerar en la cromatografía de gases, es el grado de separación que puede lograrse entre diferentes componentes en una columna. Son varios los factores que pueden influir en la separación deseada: dimensiones de la columna, temperatura, velocidad de flujo de gas portador, volumen de la muestra y caída de la presión de columna. En la Figura 6.11 se observan los principales componentes de un cromatógrafo de gases.

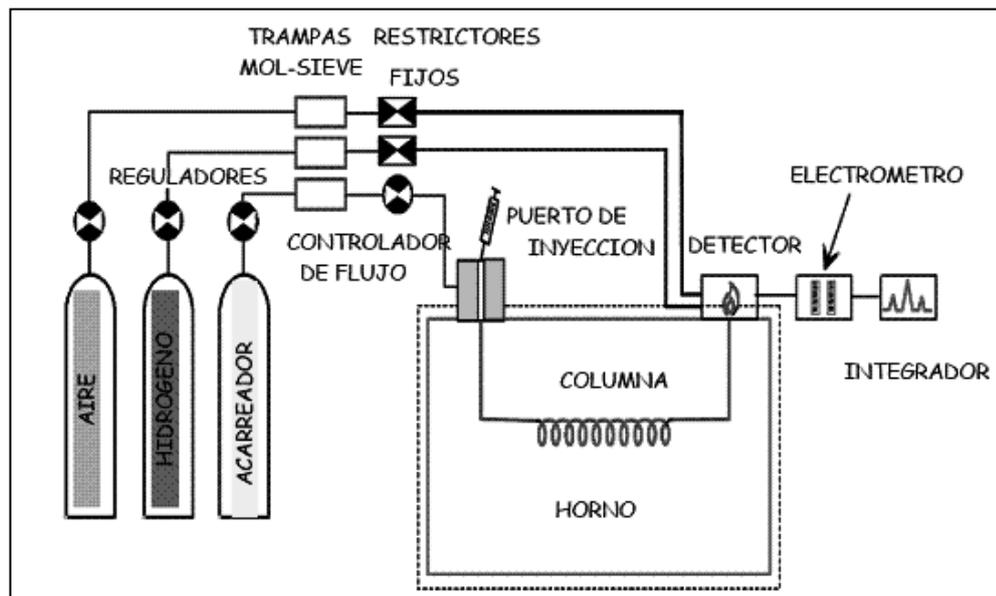


Figura 6.11.- Componentes importantes de un cromatógrafo de gases

Fuente: Quiminet, Componentes de un cromatógrafo,
<http://www.quiminet.com/pr8/Cromatografia%2Bde%2Bgases.htm>, 2009

Existen dos diferentes tipos de columnas: las empacadas y las capilares. En las primeras el soporte se encuentra empacado en tubos de acero inoxidable o vidrio, de 5m de longitud y de 3 a 6 mm de diámetro, mientras mayor es el diámetro es posible separar una mayor cantidad de compuestos. Las columna capilares son de una longitud mucho mayor pudiendo llegar a 100m con un diámetro de 0.1 a 0.3mm, esta cuentan con una mayor resolución, menor tiempo de análisis y una mayor sensibilidad, aunque la muestra por correr debe ser menor. Algunas de las sustancias más utilizadas como fases estacionarias líquidas en un cromatógrafo de gases se pueden apreciar en la tabla 6.5.

Tabla 6.5.- Fases estacionarias líquidas de uso común en cromatografía

Nombre comercial	Descripción	Polaridad	T° líquido mín. - máx.
Escualeno	Escualeno	Baja	20 a 100
OV-1	100% goma de silicona	Baja	30 a 300
OV-101	100% metil silicona liq.	media baja	0 a 350
Carbowax 20M	Polietilen glicol	Alta	60 a 225

Los gases portadores que se utilizan con más frecuencia son nitrógenos, helio, argón y gas carbónico. Su elección se basa en parte por el factor económico, pero un criterio importante es el tipo de detector de conductividad térmica empleado y su sensibilidad (ver Tabla 6.6).

Tabla 6.6.- Conductividad térmica de algunos gases

Sustancia	ct: $\text{cal cm}^{-2} \text{s}^{-2} / ^\circ\text{C cm}^{-1}$
Nitrógeno	5.81
Helio	34.80
Hidrogeno	41.60
Metano	7.21
CO ₂	13.52

Detector de conductividad térmica. La capacidad de enfriamiento de un gas está basada en la facilidad que tiene para transferir el calor que absorbe, cualidad representada por su valor de conductividad térmica. Entre más grande sea el valor, la capacidad para transmitir el calor será mejor. Por lo tanto, si se suministra una cantidad constante de energía eléctrica al filamento del detector, su temperatura está en función de la conductividad térmica del gas acarreador. Los filamentos deben ser resistentes a los cambios de temperatura y a la corrosión química, se fabrican principalmente en platino, tungsteno y níquel.

Cálculos en cromatografía. Con los datos de un cromatograma es posible realizar una serie de cálculos sencillos para conocer parámetros como la eficiencia de la columna, además, si aplicamos técnica de estándares se puede conocer también la concentración de las muestras.

En la Figura 6.12 se puede observar el cromatograma realizado en el laboratorio, donde se aprecian los picos que muestran el momento en el cual entran en combustión los distintos hidrocarburos analizados.

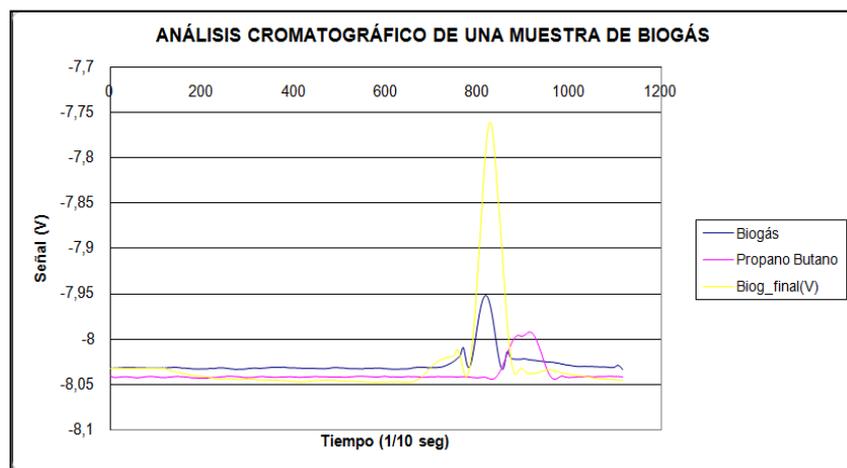


Figura 6.12.- Cromatograma de una muestra de biogás generado tras la experimentación.

6.7.4.2 Resultados del cromatógrafo de gases con una muestra de biogás

Para conocer la presencia de biogás en el interior de los biodigestores, fue necesario realizar un análisis cromatográfico comparando una muestra tomada de estos y una muestra de un gas conocido, en este caso una mezcla de propano-butano contenida en un encendedor comercial.

Se procedió en principio a tomar una muestra 3cc de gas del interior de un biodigestor de experimentación con una jeringuilla, esta muestra es introducida en el puerto de inyección del equipo cromatógrafo, se hace correr el programa. Al cabo de unos segundos, se visualizan picos en la curva generada en el monitor; los hidrocarburos, dependiendo el número de carbonos que presenten en su cadena química, se inflaman en el cromatógrafo de gases con mayor o menor velocidad, a menor número de carbonos, este entrará en combustión en menos tiempo y viceversa.

En la Tabla 6.7, se pueden apreciar los resultados en función del tiempo de inflamación de los hidrocarburos analizados, este tiempo representa el momento en que se produjeron picos en la curva de los cromatogramas. Se analizaron dos muestras diferentes de distintos experimentos y los resultados fueron idénticos. El cromatógrafo se calibrado con los parámetros de la Tabla 6.8.

Tabla 6.7.- Tiempos en los cuales se inflamaron las muestras analizadas en el cromatógrafo de gases.

Muestra	Tiempo
Biogás	66s
Propano	80s
Butano	83s
H ₂ S	105s

Tabla 6.8.- Parámetros de calibración del cromatógrafo de gases empleado en el análisis de biogás generado en la experimentación.

Parámetro	Unidad
Hidrógeno	50%
Nitrógeno	50%
Aire	100%
Isoterma	24°C
Columna	25m
Rango	2
Atenuación	3

El análisis cromatográfico realizado en la muestras solo fue para comprobar la presencia de metano en el gas generado en los biodigestores, no se pudo analizar la cantidad o el porcentaje de metano debido a la carencia de equipo necesario en los laboratorios para dicha determinación y por sus elevados costos en una entidad privada.

CAPÍTULO 7

RESULTADOS

7.1 Fase experimental

Mediante la aplicación del diseño experimental 2^k se obtuvo una matriz de experimentación (Tabla 6.2) de dos niveles para variar los principales parámetros de producción de biogás y medir la variación de presión. Las principales variables que se alternarán para ver su influencia sobre la producción, como ya explicó con anterioridad (Tabla 6.1), serán la temperatura, el potencial hidronio (pH), el tipo de inóculo que se aplicara y el tiempo de permanencia adecuado para la maximización.

Los datos de las variables fueron tomados cada media hora mediante el programa creado para el control automatizado de la fermentación, en cada ensayo se mantuvo como constante los parámetros dependiendo del mismo. A continuación en la Tabla 7.1 se presentan los niveles de trabajo y experimentación:

Tabla 7.1.- Variables representativas para el análisis de producción de biogás

Nº	VARIABLES	RANGOS		CERO	UNIDAD
x ₁	Inóculo	Trucha	Cerdo	Res	%
x ₂	Temperatura	18	50	37	°C
x ₃	Tiempo de permanencia	0,25	1	0,5	Mes
x ₄	Potencial hidronio (pH)	6,5	7,5	7,0	-----

El número de datos obtenidos diariamente fueron sometidos al cálculo de una media para obtener un dato aproximado de la producción diaria de biogás para

cada experimento. Por último se realizó una prueba cero con los parámetros más aceptables según la bibliografía revisada, esto es; $T^{\circ} = 37^{\circ}\text{C}$, Inóculo = Excretas de Res, $\text{pH} = 7$ (neutro) y un tiempo de retención de 15 días (0,5 de mes).

En la Tabla 7.2 se observan los parámetros y el número de experimentos realizados en laboratorio.

Tabla 7.2.- Número de experimentos y las variables para cada evaluación

Nº	Inóculo	Temperatura	Tiempo de permanencia.	Potencial Hidronio (pH)
1	Trucha	20	0,25	6
2	Cerdo	20	0,25	6
3	Trucha	50	0,25	6
4	Cerdo	50	0,25	6
5	Trucha	20	1,00	6
6	Cerdo	20	1,00	6
7	Trucha	50	1,00	6
8	Cerdo	50	1,00	6
9	Trucha	20	0,25	8
10	Cerdo	20	0,25	8
11	Trucha	50	0,25	8
12	Cerdo	50	0,25	8
13	Trucha	20	1,00	8
14	Cerdo	20	1,00	8
15	Trucha	50	1,00	8
16	Cerdo	50	1,00	8

Con la matriz de experimentación se procedió al desarrollo de los análisis en laboratorio.

7.1.1 Experimento Nº 1

A continuación se presentan las condiciones de experimentación de la primera carga (Tabla 7.3), los datos obtenidos por el computador después de transcurrido el experimento (Tabla 7.4) y su correspondiente grafica (Gráfico 7.1).

Tabla 7.3.- Condiciones de experimentación de la primera carga.

pH	Temperatura	T. de retención	Inoculo	Tº. media	P. inicial
6	20°C	7 días (0,25mes)	Trucha	20,4	15,1

Tabla 7.4.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento Nº 1)

Producción de Biogás		
Tiempo (días)	Δ Presión (kPa)	T. media
0	15,1	20,2
0,5	15,1	20,1
1	15,1	20,4
1,5	15,1	20,5
2	15,1	20,2
2,5	15,1	20,5
3	15,1	20,2
3,5	15,2	21,6
4	15,3	19,8
4,5	15,3	19,8
5	15,3	20,3
5,5	15,3	20,2
6	15,3	20,3
6,5	15,4	20,3
7	15,4	19,9

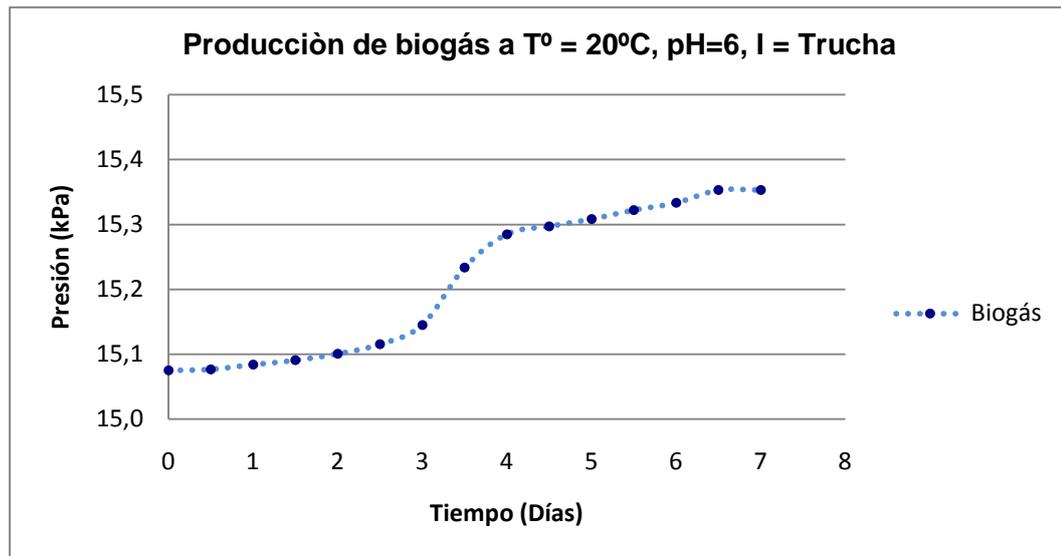


Gráfico 7.1.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 1).

7.1.1.1 Interpretación: experimento N° 1

La variación de presión que presentó el experimento fue de 0,3 kPa. Durante los primeros días de fermentación no existió ninguna producción, la cual comenzaría a partir del día 3, sin embargo, esta producción fue muy pequeña. El proceso se estanca luego del cuarto día, como se puede ver en el gráfico 7.1, luego de la pequeña producción de biogás no se tiene mayor influencia hasta el final.

7.1.2 Experimento N° 2

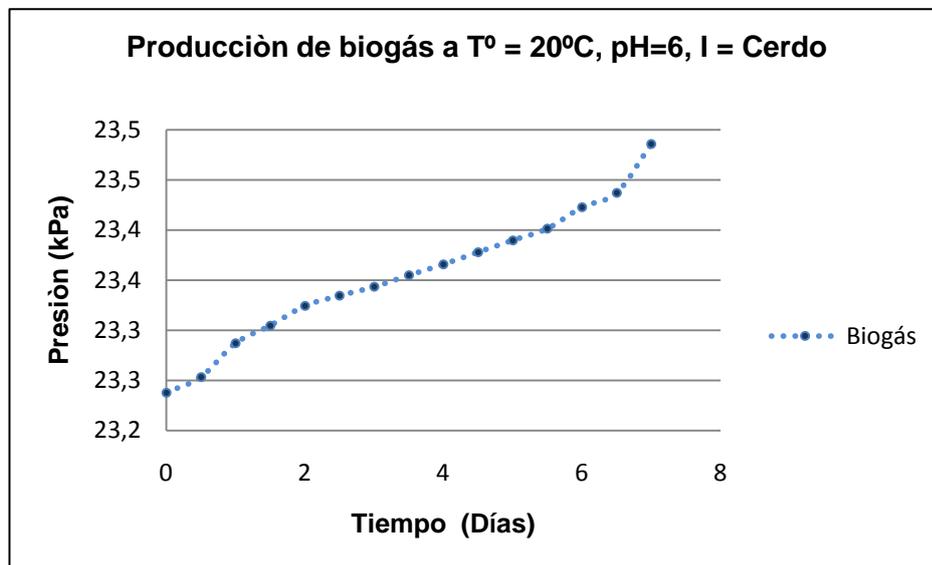
Se pueden observar las condiciones de experimentación de la segunda carga en la Tabla 7.5, los datos obtenidos después de transcurrido el experimento en la Tabla 7.6 y su gráfica en el Gráfico 7.2.

Tabla 7.5.- Condiciones de experimentación de la segunda carga.

pH	Temperatura	T. de retención	Inoculo	T°. media	P. inicial
6	20°C	7 días (0,25mes)	Cerdo	20,2	23,2

Tabla 7.6.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 2).

Producción de Biogás		
<i>Tiempo (días)</i>	Δ <i>Presión (kPa)</i>	<i>T. media</i>
0	23,2	22,2
0,5	23,3	22,5
1	23,3	22,6
1,5	23,3	22,4
2	23,3	22,7
2,5	23,3	22,7
3	23,3	22,8
3,5	23,4	22,5
4	23,4	22,7
4,5	23,4	22,7
5	23,4	22,4
5,5	23,4	22,9
6	23,4	22,4
6,5	23,4	22,3
7	23,5	22,4

**Gráfico 7.2.-** Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 2)

7.1.2.1 Interpretación: experimento N° 2

La variación de presión del experimento fue de 0,25 kPa., presenta una producción constante desde que arranca la fermentación y se puede observar que tiene una producción mínima debido a las condiciones de la experimentación.

7.1.3 Experimento N° 3

Se pueden observar las condiciones de experimentación de la tercera carga en la Tabla 7.7, los datos obtenidos después de transcurrido el experimento en la Tabla 7.8 y su gráfica en el Gráfico 7.3.

Tabla 7.7.- Condiciones de experimentación de la tercera carga.

pH	Temperatura	T. de retención	Inoculo	T°. media	P. inicial
6	50°C	7 días (0,25mes)	Trucha	47,0	25,03

Tabla 7.8.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 3).

Producción de Biogás		
<i>Tiempo (días)</i>	Δ Presión (kPa)	<i>T. media</i>
0	25,03	41,0
0,5	25,44	41,0
1	26,03	41,2
1,5	26,70	42,4
2	27,24	44,0
2,5	27,80	44,0
3	28,38	44,1
3,5	28,94	44,9
4	29,73	45,3
4,5	30,30	46,7
5	30,87	49,1
5,5	31,31	47,1
6	32,11	47,7
6,5	32,81	46,9
7	34,19	44,1

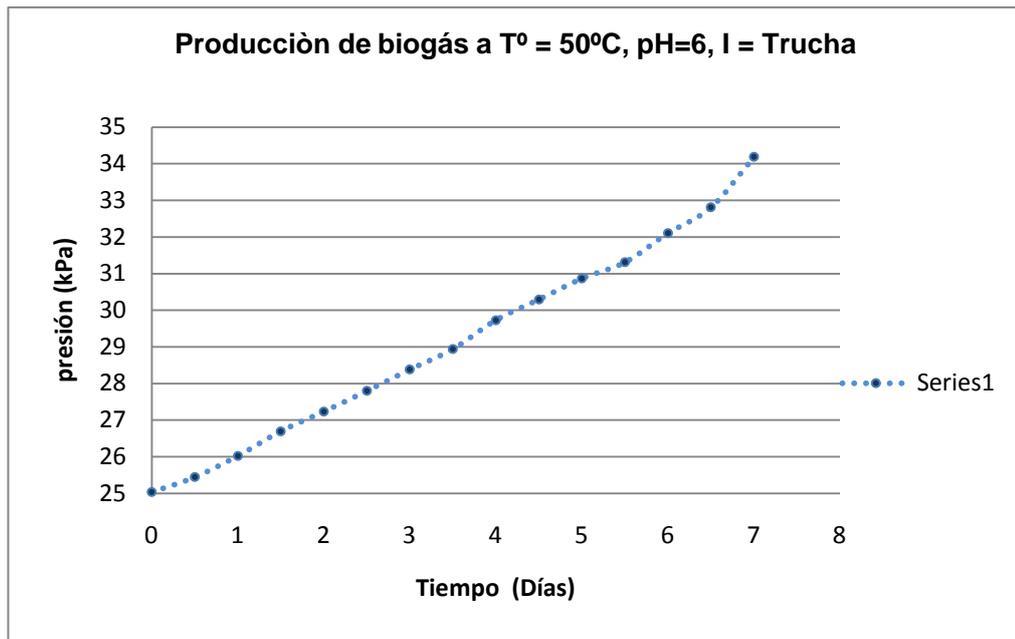


Gráfico 7.3.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 3)

7.1.3.1 Interpretación: experimento N° 3

La variación de presión obtenida en el experimento fue de 9,15 kPa., se puede observar que hay un incremento constante en la producción de biogás, la limitante del proceso fue el escaso tiempo de fermentación igual a 7 días. El inoculo utilizado responde mejor a temperaturas altas a comparación del primer experimento que se lo realizo a una temperatura menor (20°C), sin embargo, la constante exposición a temperaturas elevadas puede causar la muerte de la biomasa de la carga inicial, y como consecuencia terminar el proceso de producción, reduciendo el porcentaje de rendimiento del mismo.

7.1.4 Experimento N° 4

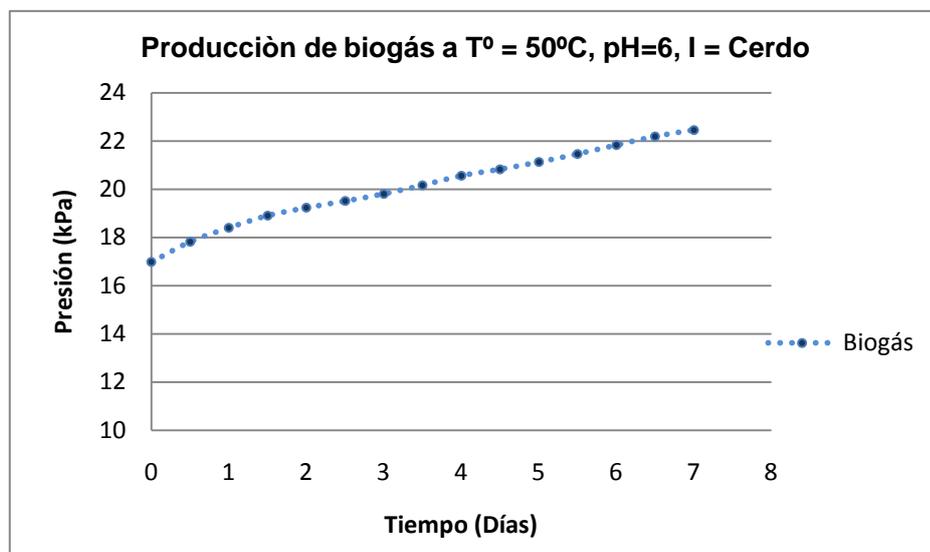
Se pueden observar las condiciones de experimentación del cuarto experimento en la Tabla 7.9, los datos obtenidos después de transcurrido el experimento en la Tabla 7.10 y su gráfica en el Gráfico 7.4.

Tabla 7.9.- Condiciones de experimentación de la cuarta carga.

pH	Temperatura	T. de retención	Inoculo	Tº. media	P. inicial
6	50°C	7 días (0,25mes)	Cerdo	47,0	16,98

Tabla 7.10.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 4).

Producción de Biogás		
Tiempo (días)	Δ Presión (kPa)	T. media
0	16,98	29,7
0,5	17,83	34,3
1	18,41	42,3
1,5	18,91	46,4
2	19,24	45,2
2,5	19,51	39,9
3	19,81	40,9
3,5	20,17	42,5
4	20,57	44,4
4,5	20,83	46,2
5	21,13	48,5
5,5	21,47	49,8
6	21,84	50,1
6,5	22,20	50,2
7	22,46	49,9

**Gráfico 7.4.-** Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 4)

7.1.4.1 Interpretación: experimento N° 4

El incremento de presión que se produjo durante la fermentación de la materia prima a una temperatura elevada de 50°C. fue de 5,48 kPa. , las temperaturas elevadas incrementan la producción, pero al mismo tiempo pueden ser limitantes del proceso.

7.1.5 Experimento N° 5

Se pueden observar las condiciones de experimentación de la tercera carga en la Tabla 7.11, los datos obtenidos después de transcurrido el experimento en la Tabla 7.12 y su gráfica en el Gráfico 7.5.

Tabla 7.11.- Condiciones de experimentación de la quinta carga.

pH	Temperatura	T. de retención	Inoculo	T°. media	P. inicial
6	20°C	30 días (1 mes)	Trucha	19,4	12,5

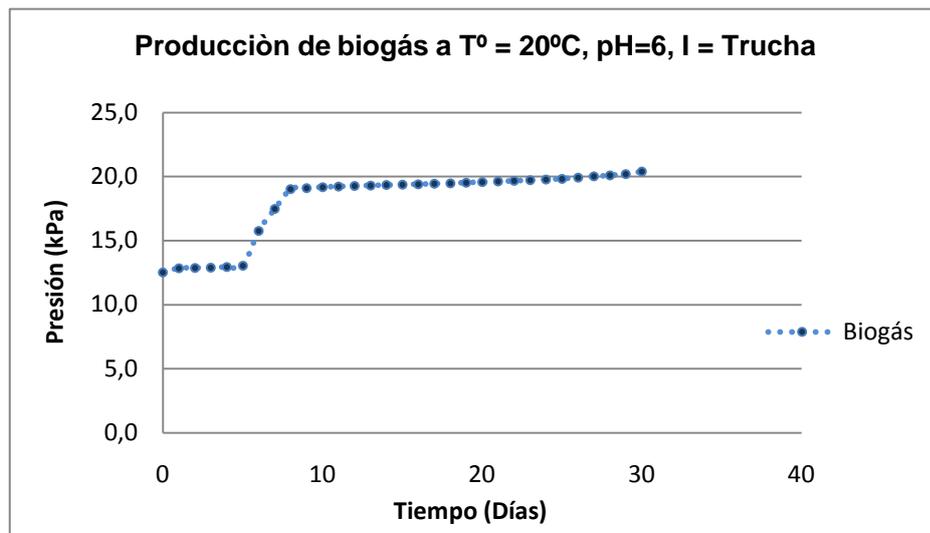


Gráfico 7.5.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 5).

Tabla 7.12.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 5).

Producción de Biogás		
<i>Tiempo (días)</i>	Δ <i>Presión (kPa)</i>	<i>T. media</i>
0	12,5	22,4
1	12,8	22,3
2	12,9	22,4
3	12,9	21,3
4	12,9	21,1
5	13,1	20,0
6	15,7	20,2
7	17,5	21,3
8	19,0	21,7
9	19,1	21,8
10	19,2	21,7
11	19,2	21,4
12	19,3	21,6
13	19,3	22,0
14	19,3	21,7
15	19,4	21,7
16	19,4	21,4
17	19,4	21,8
18	19,5	22,0
19	19,5	21,5
20	19,6	21,9
21	19,6	21,4
22	19,7	21,5
23	19,7	21,5
24	19,8	21,1
25	19,8	21,0
26	19,9	20,6
27	20,0	20,5
28	20,1	20,3
29	20,2	20,2
30	20,4	20,2

7.1.5.1 Interpretación: experimento N° 5

El incremento de presión que se obtuvo fue de 7,9 kPa, la fermentación anaerobia presenta un incremento a partir del día 5 en donde existe un gran incremento de presión, de aquí la producción será lenta hasta llegar el fin del tiempo de permanencia. Se puede observar en la gráfica 7.5 que la mayoría del proceso es lineal, es decir, no sufre mayor alteración durante la fermentación, una de las razones por la cuales el proceso se ve estancado, con poca variación de presión, es causado por el descenso gradual que sufre el medio de cultivo durante el proceso, es recomendable para un proceso de producción de biogás neutralizar el pH para que el medio sea el más conveniente para la producción.

7.1.6 Experimento N° 6

Se pueden observar las condiciones de experimentación de la tercera carga en la Tabla 7.13, los datos obtenidos después de transcurrido el experimento en la Tabla 7.14 y su gráfica en el Gráfico 7.6.

Tabla 7.13.- Condiciones de experimentación de la sexta carga.

pH	Temperatura	T. de retención	Inoculo	T°. media	P. inicial
6	20°C	30 días (1 mes)	Cerdo	19,4	7,4

Tabla 7.14.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 6).

Producción de Biogás		
<i>Tiempo (días)</i>	Δ <i>Presión (kPa)</i>	<i>T. media</i>
0	7,4	22,5
1	7,7	22,3
2	7,9	22,2
3	8,0	22,1
4	8,0	22,1
5	8,1	22,1
6	8,1	22,1
7	8,2	22,1
8	8,2	22,1
9	8,3	21,8
10	8,3	22,0
11	8,4	22,0
12	8,4	21,9
13	8,5	21,9
14	8,6	21,8
15	8,7	21,8
16	9,3	21,4
17	10,7	20,4
18	11,0	20,4
19	11,7	20,4
20	13,2	20,5
21	16,5	20,2
22	18,4	20,2
23	19,5	20,0
24	20,6	19,8
25	20,9	19,8
26	21,5	19,8
27	23,2	19,7
28	23,5	19,7
29	23,4	19,9
30	23,4	20,0

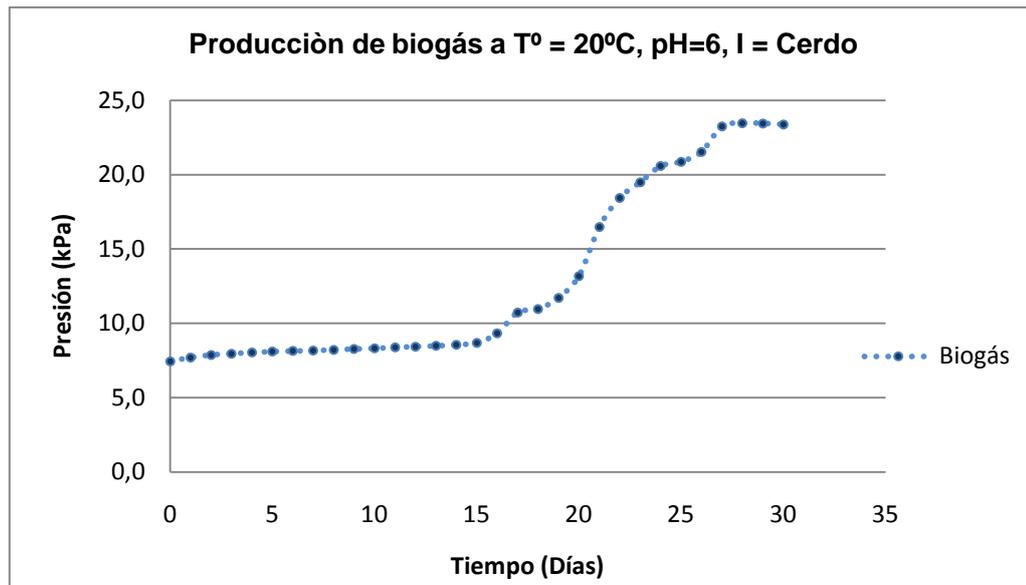


Gráfico 7.6.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 6).

7.1.6.1 Interpretación: experimento N° 6

15,9 kPa. fue el incremento de presión que se obtuvo luego del proceso de fermentación anaerobia para la producción de biogás, el inoculo utilizado (excretas de cerdo) necesitó de un tiempo considerable para adaptarse ya que la producción de biogás comienza a partir del día 16, la misma que es progresiva hasta el final del proceso. Como se puede ir observando en cada uno de los experimentos, el tiempo juega un papel importante en el proceso, sin embargo, la temperatura se torna en parte limitante del proceso.

7.1.7 Experimento N° 7

Condiciones de experimentación de la tercera carga en la Tabla 7.15, los datos obtenidos del experimento en la Tabla 7.16 y su gráfica en el Gráfico 7.7.

Tabla 7.15.- Condiciones de experimentación de la séptima carga.

pH	Temperatura	T. de retención	Inoculo	T°. media	P. inicial
6	50°C	30 días (1 mes)	Trucha	47,6	47,9

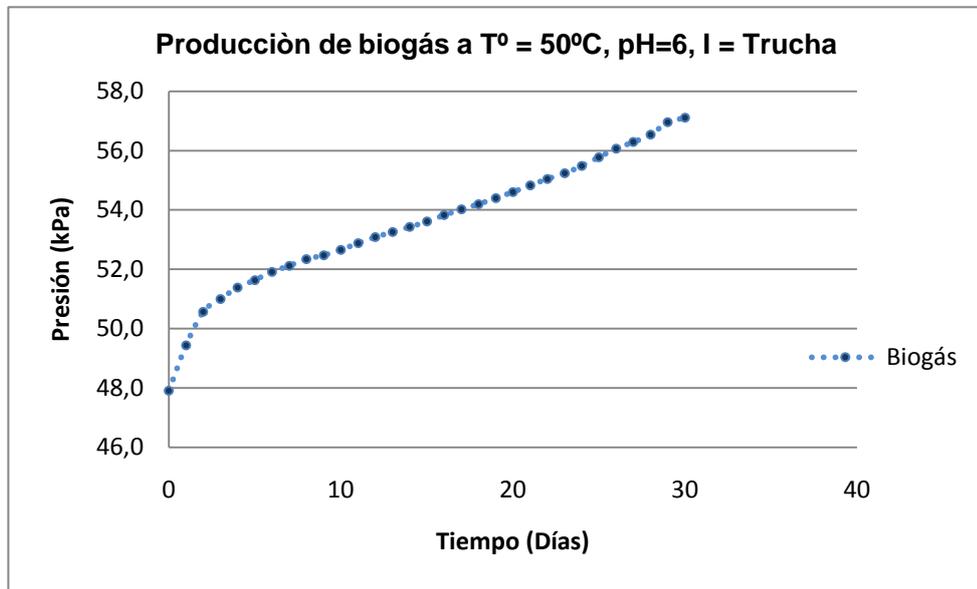
**Gráfico 7.7.-** Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 7)

Tabla 7.16.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 7).

Producción de Biogás		
<i>Tiempo (días)</i>	Δ <i>Presión (kPa)</i>	<i>T. media</i>
0	47,9	44,9
1	49,4	48,9
2	50,6	46,7
3	51,0	41,1
4	51,4	45,4
5	51,6	49,4
6	51,9	50,1
7	52,1	50,0
8	52,3	50,0
9	52,5	50,1
10	52,7	50,0
11	52,9	50,0
12	53,1	50,0
13	53,3	46,8
14	53,4	46,8
15	53,6	43,1
16	53,8	48,6
17	54,0	50,6
18	54,2	50,6
19	54,4	50,6
20	54,6	50,6
21	54,8	50,5
22	55,0	50,5
23	55,2	50,4
24	55,5	50,4
25	55,8	50,1
26	56,1	48,9
27	56,3	44,5
28	56,5	49,0
29	57,0	46,2
30	57,1	48,2

7.1.7.1 Interpretación: experimento N° 7

El incremento de presión en el experimento séptimo fue de 9,2 kPa., el proceso tiene un ascenso desde el inicio de la fermentación creando así una producción de biogás constante pero pequeña. Como se puede observar en el gráfico 7.7 al inicio del proceso existe un mayor incremento de presión que con el pasar del tiempo va manteniéndose en un crecimiento constante, la limitación de producción se da por la temperatura elevada del proceso que provoca la muerte de la mayor parte de la flora del sistema, sin embargo, la producción continua por las células que sobreviven a las altas temperaturas.

7.1.8 Experimento N° 8

Se pueden observar las condiciones de experimentación de la tercera carga en la Tabla 7.17, los datos obtenidos después de transcurrido el experimento en la Tabla 7.18 y su gráfica en el Gráfico 7.8.

Tabla 7.17.- Condiciones de experimentación de la octava carga.

Ph	Temperatura	T. de retención	Inoculo	T°. media	P. inicial
6	50°C	30 días (1 mes)	Cerdo	47,6	16,0

Tabla 7.18.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 8).

Producción de Biogás		
<i>Tiempo (días)</i>	Δ <i>Presión (kPa)</i>	<i>T. media</i>
0	16,0	46,9
1	19,4	50,9
2	19,7	46,8
3	19,8	41,1
4	19,8	45,4
5	19,9	49,4
6	19,9	50,1
7	19,9	50,1
8	20,0	50,1
9	20,0	50,1
10	20,1	50,1
11	20,1	40,2
12	20,1	39,3
13	20,1	45,7
14	20,1	50,1
15	20,2	50,6
16	20,2	50,7
17	20,2	50,7
18	20,2	50,4
19	20,3	50,5
20	20,3	50,4
21	20,3	50,3
22	20,3	50,3
23	20,4	50,4
24	20,4	48,6
25	20,4	42,2
26	20,5	41,1
27	20,7	48,6
28	21,3	50,1
29	21,5	48,0
30	21,8	46,4

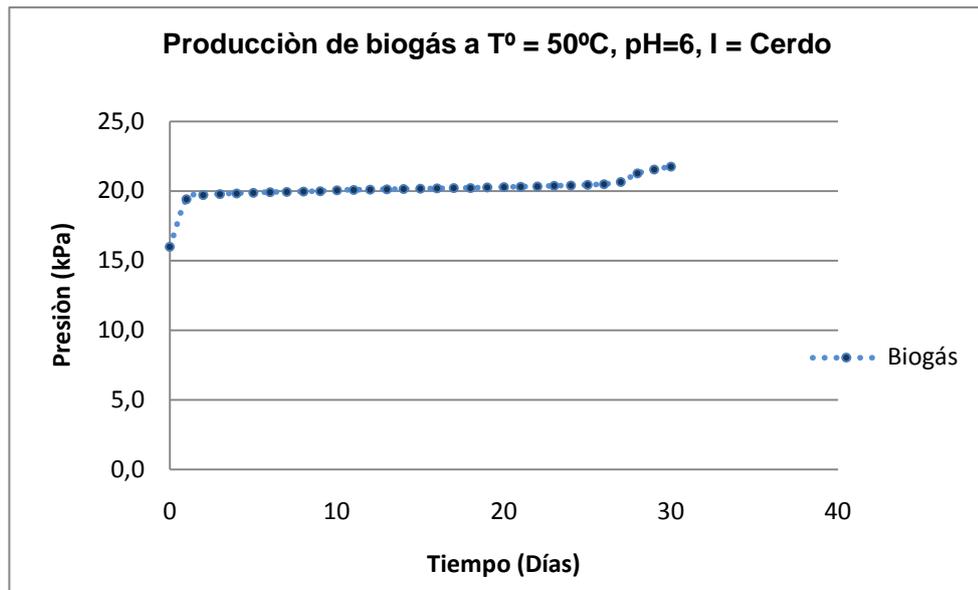


Gráfico 7.8.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 8)

7.1.8.1 Interpretación: experimento N° 8

El incremento de presión fue de 5,8 kPa., el proceso tiene un incremento al inicio de la fermentación, sin embargo sufre un estancamiento debido a una posible muerte de los microorganismos por causa de la elevada temperatura. Al final se puede observar un leve incremento creado por las células que sobrevivieron durante el proceso.

7.1.9 Experimento N° 9

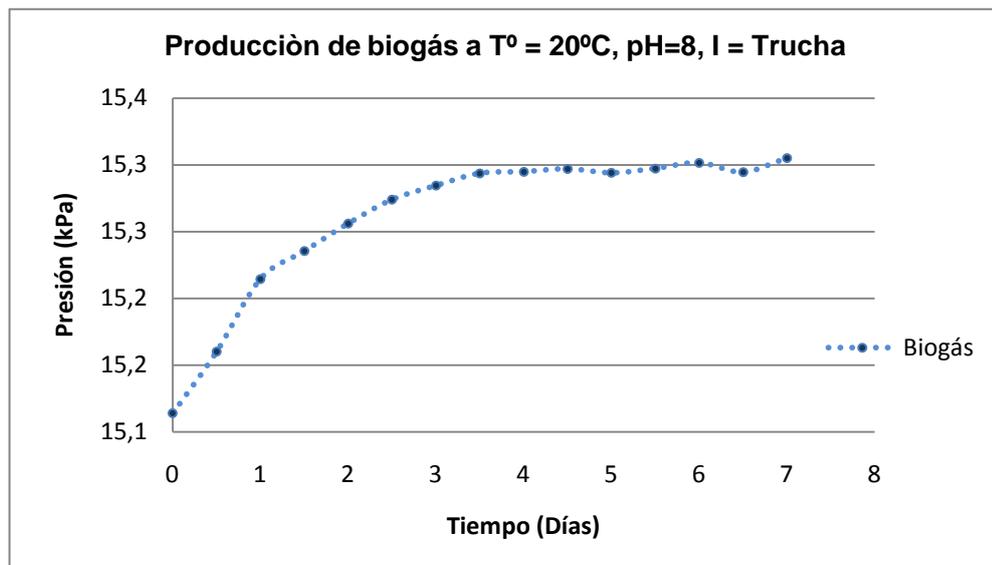
Se pueden observar las condiciones de experimentación de la tercera carga en la Tabla 7.19, los datos obtenidos después de transcurrido el experimento en la Tabla 7.20 y su gráfica en el Gráfico 7.9.

Tabla 7.19.- Condiciones de experimentación de la novena carga.

pH	Temperatura	T. de retención	Inoculo	T°. media	P. inicial
8	20°C	7 días (0,25 mes)	Trucha	20,2	15,1

Tabla 7.20.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 9).

Producción de Biogás		
Tiempo (días)	Δ Presión (kPa)	T. media
0	15,1	19,2
0,5	15,2	19,8
1	15,2	19,5
1,5	15,2	20,0
2	15,3	19,7
2,5	15,3	20,0
3	15,3	19,5
3,5	15,3	19,8
4	15,3	20,0
4,5	15,3	19,8
5	15,3	20,4
5,5	15,3	22,0
6	15,3	19,7
6,5	15,3	19,6
7	15,3	19,7

**Gráfico 7.9.-** Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 9)

7.1.9.1 Interpretación: experimento N° 9

El incremento de presión fue ínfimo (0,19 kPa.) el cual se produjo al inicio de la fermentación hasta el tercer día, a partir de aquí se estabilizó la misma dando como resultado el final de la fermentación. La variable de diferencia en este experimento fue el cambio de pH de 6 a 8, al comparar con el experimento de condiciones iguales pero pH diferente (experimento n°1), los resultados son prácticamente iguales con una diferencia de 0,1kPa. lo que indica que la variación de pH no es una variable significativa en el proceso de producción de biogás.

7.1.10 Experimento N° 10

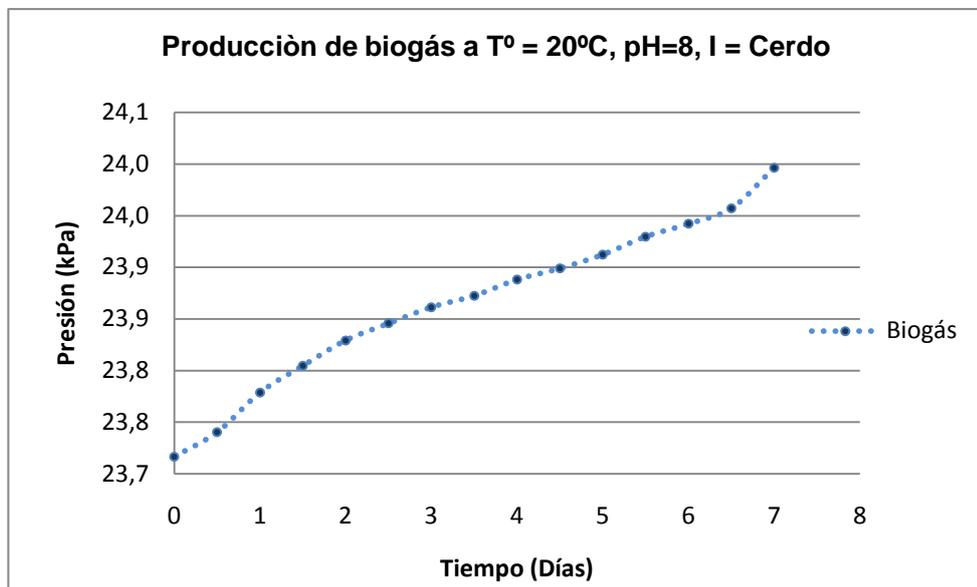
Se pueden observar las condiciones de experimentación de la tercera carga en la Tabla 7.21, los datos obtenidos después de transcurrido el experimento en la Tabla 7.22 y su gráfica en el Gráfico 7.10.

Tabla 7.21.- Condiciones de experimentación de la décima carga.

pH	Temperatura	T. de retención	Inoculo	T°. media	P. inicial
8	20°C	7 días (0,25 mes)	Cerdo	20,4	23,7

Tabla 7.22.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 10).

Producción de Biogás		
Tiempo (días)	Δ Presión (kPa)	T. media
0	23,7	21,6
0,5	23,7	22,0
1	23,8	22,4
1,5	23,8	22,5
2	23,8	22,3
2,5	23,8	22,4
3	23,9	22,3
3,5	23,9	22,3
4	23,9	22,1
4,5	23,9	22,2
5	23,9	22,1
5,5	23,9	22,4
6	23,9	22,3
6,5	24,0	21,8
7	24,0	21,8

**Gráfico 7.10.-** Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 10)

7.1.10.1 Interpretación: experimento N° 10

Como se puede observar en la gráfica, el incremento de biogás con respecto al incremento de la presión es proporcional, durante el proceso de fermentación de la materia orgánica existe una constante producción de biogás en pequeñas cantidades, y el cambio de pH sigue siendo insignificante para los dos inóculos (cerdo +1 y trucha -1) utilizados para la experimentación, pese a que la producción ha aumentado a 0,3 kPa.

7.1.11 Experimento N° 11

Se pueden observar las condiciones de experimentación de la tercera carga en la Tabla 7.23, los datos obtenidos después de transcurrido el experimento en la Tabla 7.24 y su gráfica en el Gráfico 7.11.

Tabla 7.23.- Condiciones de experimentación de la décima primera carga.

pH	Temperatura	T. de retención	Inoculo	T°. media	P. inicial
8	50°C	7 días (0,25 mes)	Trucha	46,9	25,01

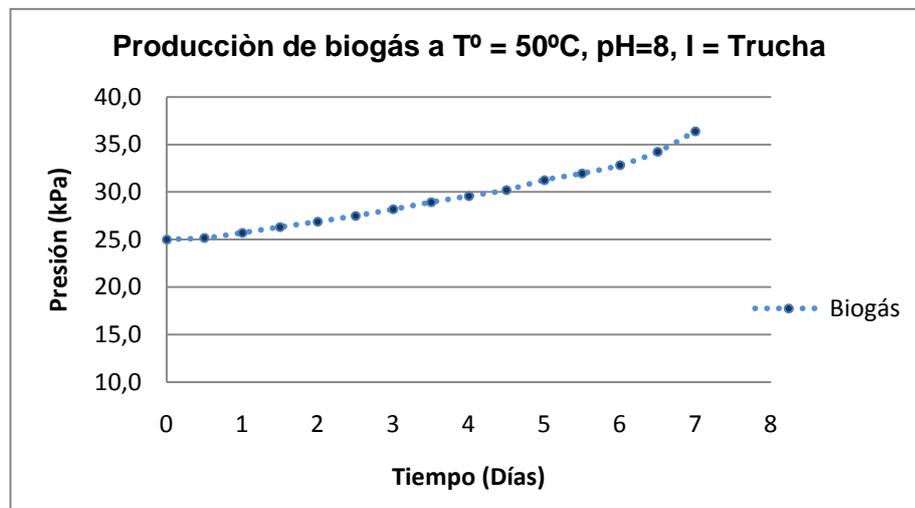


Gráfico 7.11.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 11)

Tabla 7.24.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 11).

Producción de Biogás		
<i>Tiempo (días)</i>	Δ <i>Presión (kPa)</i>	<i>T. media</i>
0	25,01	50,9
0,5	25,16	42,8
1	25,71	49,8
1,5	26,31	41,4
2	26,88	41,1
2,5	27,49	43,3
3	28,18	43,8
3	28,92	45,8
4,0	29,57	47,3
4	30,20	47,6
5,0	31,26	48,8
5	31,94	48,7
6	32,81	47,2
6	34,22	45,4
7	36,38	44,9

7.1.11.1 Interpretación: experimento N° 11

La variación de presión del experimento fue de 11,37 kPa., en la gráfica se puede observar que el proceso de fermentación se encuentra en constante crecimiento, la variación de pH en este caso se presenta positiva. Al observar la gráfica 7.11 se puede sacar como conclusión que la fermentación no termina a los 7 días, por lo contrario, la base para una buena fermentación son 7 días como mínimo, pero como ya se ha dicho antes; la temperatura juega un papel importante en este proceso. Por otro lado el cambio de pH en este caso incrementa la producción a comparación del proceso número tres (9,5kPa.).

7.1.12 Experimento Nº 12

Se pueden observar las condiciones de experimentación de la tercera carga en la Tabla 7.25, los datos obtenidos después de transcurrido el experimento en la Tabla 7.26 y su gráfica en el Gráfico 7.12.

Tabla 7.25.- Condiciones de experimentación de la décima segunda carga.

pH	Temperatura	T. de retención	Inoculo	Tº. media	P. inicial
8	50°C	7 días (0,25 mes)	Cerdo	46,9	1,21

Tabla 7.26.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento Nº 12).

Producción de Biogás		
<i>Tiempo (días)</i>	Δ <i>Presión (kPa)</i>	<i>T. media</i>
0	1,21	30,7
0,5	1,63	34,0
1	1,78	42,4
1,5	1,84	46,5
2	1,90	44,4
2,5	1,94	40,0
3	1,97	40,7
3,5	2,02	42,7
4	2,05	44,7
4,5	2,08	46,7
5	2,13	48,5
5,5	2,18	49,6
6	2,24	50,2
6,5	2,34	50,1
7	2,53	49,8

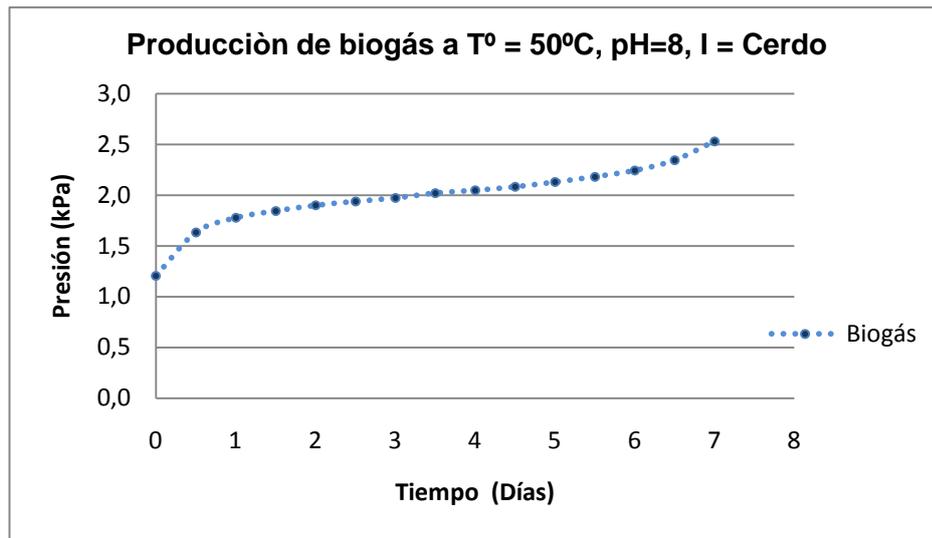


Gráfico 7.12.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 12).

7.1.12.1 Interpretación: experimento N° 12

El incremento de presión en el experimento fue de 1,32 kPa., como se puede apreciar en la gráfica, la variación se da lentamente por causa de la alteración del pH que es el único factor que se ha modificado para este ensayo. Un pH alcalino (8) causó interferencias en la producción de biogás, como se pudo observar en el experimento n°4, la variación de presión fue mayor a la obtenida en el presente ensayo, en conclusión, la micro flora de los excrementos del cerdo tiene mayor adaptación a un pH más ácido, este pH causó la debilitación de las células que a más de soportar la temperatura de 50°C (variable del experimento) no pudo degradar la materia orgánica en metabolitos necesarios para la producción de biogás.

7.1.13 Experimento N° 13

Se pueden observar las condiciones de experimentación de la tercera carga en la Tabla 7.27, los datos obtenidos después de transcurrido el experimento en la Tabla 7.28 y su gráfica en el Gráfico 7.13.

Tabla 7.27.- Condiciones de experimentación de la décima tercera carga.

pH	Temperatura	T. de retención	Inoculo	T°. media	P. inicial
8	20°C	30 días (1 mes)	Trucha	19,2	14,8

Tabla 7.28.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 13).

Producción de Biogás		
<i>Tiempo (días)</i>	Δ Presión (kPa)	<i>T. media</i>
0	14,8	19,0
1	14,8	19,0
2	15,1	19,0
3	15,1	19,0
4	15,4	19,0
5	15,1	19,0
6	15,6	20,7
7	16,9	21,0
8	18,5	21,1
9	18,9	21,1
10	18,9	21,1
11	18,9	21,2
12	19,4	21,3
13	19,5	21,2
14	19,6	21,3
15	19,6	21,5
16	19,7	21,4
17	19,7	21,2
18	19,7	21,3
19	19,7	21,3
20	19,8	21,5
21	19,8	21,7
22	19,8	21,5
23	19,9	21,3
24	19,9	21,3
25	19,9	21,4
26	20,0	21,6
27	20,0	21,5
28	20,1	21,5
29	20,2	21,6
30	20,3	21,4

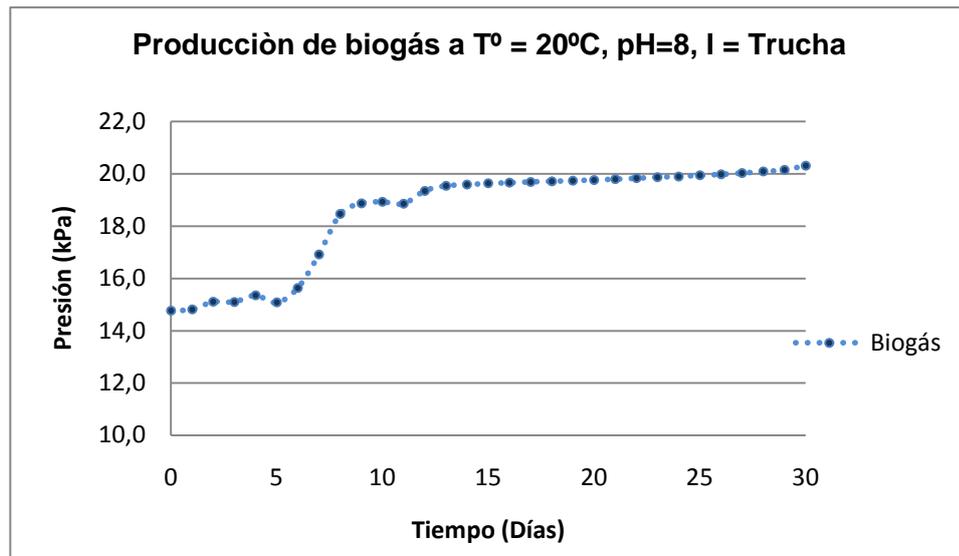


Gráfico 7.13.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 13)

7.1.13.1 Interpretación: experimento N° 13

El incremento de presión que se obtuvo fue de 5,6 kPa. Los primeros días de fermentación el proceso no tiene mayor variación en la presión, las primeras actividades de producción de biogás se presentan en el día seis hasta el nueve, a partir del día diez el proceso sufre un estancamiento hasta el final de la fermentación. El incremento del pH puede causar una excesiva cantidad de iones hidrogeno (H) dando como resultado una inestabilidad del medio, las células que consumen estos iones son mucho menores que las que consumen acetato, por lo que el hidrogeno se vuelve tóxico para la mayoría de microorganismos presentes. Como resultado da la resumida producción de biogás y el estancamiento del proceso.

7.1.14 Experimento N° 14

Se pueden observar las condiciones de experimentación de la tercera carga en la Tabla 7.29, los datos obtenidos después de transcurrido el experimento en la Tabla 7.30 y su gráfica en el Gráfico 7.14.

Tabla 7.29.- Condiciones de experimentación de la décima cuarta carga.

pH	Temperatura	T. de retención	Inoculo	Tº. media	P. inicial
8	20°C	30 días (1 mes)	Cerdo	19,3	14,8

Tabla 7.30.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 14).

Producción de Biogás		
<i>Tiempo (días)</i>	Δ Presión (kPa)	<i>T. media</i>
0	11,5	20,9
1	11,9	20,8
2	11,9	20,8
3	11,9	20,6
4	12,1	20,8
5	12,2	20,9
6	11,7	20,2
7	12,3	20,5
8	13,3	20,9
9	19,8	21,0
10	20,1	20,9
11	20,1	21,0
12	20,2	21,0
13	20,2	21,0
14	20,2	20,9
15	20,3	21,0
16	20,3	21,0
17	20,4	21,0
18	20,4	20,9
19	20,5	21,0
20	20,5	21,0
21	20,6	21,0
22	20,6	21,0
23	20,7	21,0
24	20,7	20,9
25	20,8	20,9
26	21,7	20,6
27	23,6	19,0
28	24,0	18,7
29	24,3	19,1
30	25,1	20,7

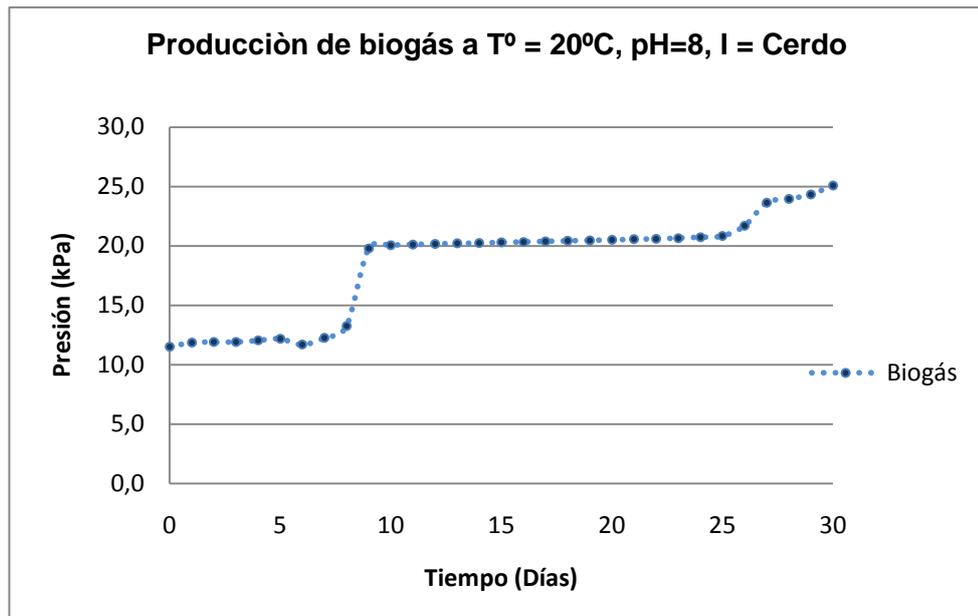


Gráfico 7.14.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 14)

7.1.14.1 Interpretación: experimento N° 14

La variación de presión fue de 13,6 kPa. Como se puede observar en la curva de producción, los primeros días de fermentación se mantiene estable, no es sino hasta el séptimo día que la presión comienza a variar positivamente, sin embargo, luego de un incremento considerable el proceso sufre un estancamiento, la producción de gas se reduce y permanece constante. La causa principal del estancamiento de un proceso de fermentación es la temperatura, temperaturas bajas inhiben la acción correcta de los microorganismos. Por último, el tramo final del proceso muestra un incremento de producción debido a que moléculas de biogás son atrapadas en el medio de cultivo, por lo que indispensable que un digestor contenga un agitador.

7.1.15 Experimento N° 15

Se pueden observar las condiciones de experimentación de la tercera carga en la Tabla 7.31, los datos obtenidos después de transcurrido el experimento en la Tabla 7.32 y su gráfica en el Gráfico 7.15.

Tabla 7.31.- Condiciones de experimentación de la décima quinta carga.

pH	Temperatura	T. de retención	Inoculo	T°. media	P. inicial
8	50°C	30 días (1 mes)	Trucha	46,7	50,0

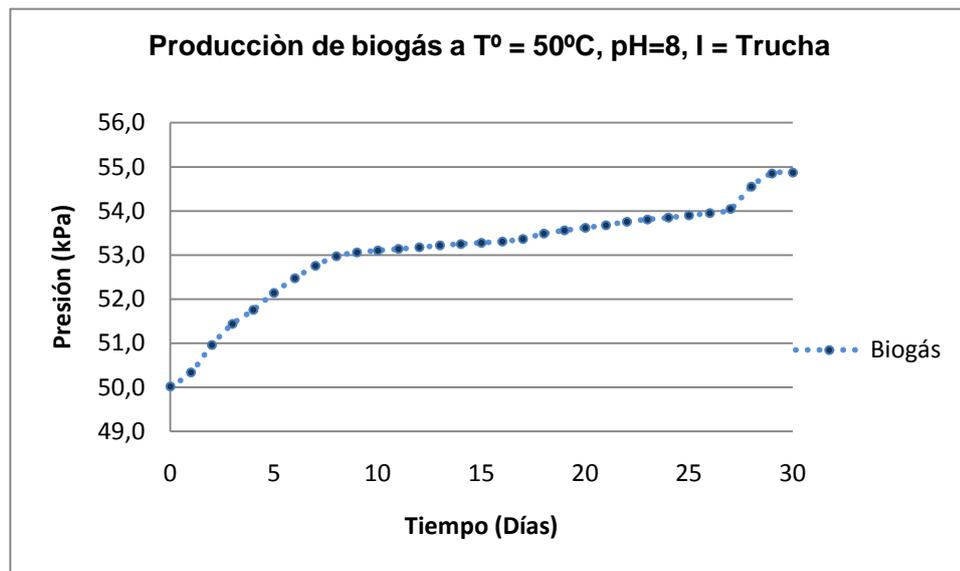


Gráfico 7.15.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 15)

Tabla 7.32.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 15).

Producción de Biogás		
<i>Tiempo (días)</i>	Δ <i>Presión (kPa)</i>	<i>T. media</i>
0	50,0	44,0
1	50,3	46,7
2	51,0	47,6
3	51,4	48,9
4	51,8	45,2
5	52,1	49,8
6	52,5	47,8
7	52,8	49,9
8	53,0	49,4
9	53,1	48,2
10	53,1	48,1
11	53,1	47,6
12	53,2	47,4
13	53,2	45,9
14	53,3	45,6
15	53,3	48,3
16	53,3	46,1
17	53,4	47,8
18	53,5	47,9
19	53,6	47,6
20	53,6	48,0
21	53,7	47,4
22	53,8	48,4
23	53,8	48,3
24	53,8	47,8
25	53,9	47,2
26	54,0	47,5
27	54,0	45,6
28	54,6	50,7
29	54,8	50,9
30	54,9	52,1

7.1.15.1 Interpretación: experimento N° 15

El incremento de pH causó una gran influencia para el inóculo utilizado en el experimento décimo quinto, la variación de presión bajó a 4,9 kPa. a comparación con el ensayo realizado con un pH = 6, como se puede observar en la figura 7.15, el incremento de presión es constante hasta el octavo día donde comienza a sufrir un estancamiento, sin embargo no cesa la producción si no que disminuye su intensidad. Por otro lado, el tipo de inóculo y la temperatura de tratamiento influyen considerablemente con la respuesta del proceso, por esta razón los ensayos realizados a temperatura ambiente tiene mejor resultados que los ensayos a altas temperaturas.

7.1.16 Experimento N° 16

Se pueden observar las condiciones de experimentación de la tercera carga en la Tabla 7.33, los datos obtenidos después de transcurrido el experimento en la Tabla 7.34 y su gráfica en el Gráfico 7.16.

Tabla 7.33.- Condiciones de experimentación de la décima sexta carga.

pH	Temperatura	T. de retención	Inoculo	T°. media	P. inicial
8	50°C	30 días (1 mes)	Cerdo	46,5	19,53

Tabla 7.34.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 16).

Producción de Biogás		
<i>Tiempo (días)</i>	Δ <i>Presión (kPa)</i>	<i>T. media</i>
0	19,53	41,5
1	19,87	44,1
2	20,05	45,1
3	20,13	49,0
4	20,19	44,2
5	20,23	47,8
6	20,27	48,3
7	20,31	48,2
8	20,34	48,0
9	20,37	48,3
10	20,41	48,1
11	20,44	48,4
12	20,47	48,3
13	20,50	43,5
14	20,52	45,7
15	20,54	42,1
16	20,57	47,2
17	20,59	48,7
18	20,62	48,7
19	20,64	48,6
20	20,67	48,5
21	20,70	48,4
22	20,73	48,4
23	20,76	48,3
24	20,79	48,3
25	20,82	48,3
26	20,85	44,5
27	20,90	48,0
28	20,95	46,4
29	21,10	44,8
30	21,18	46,7

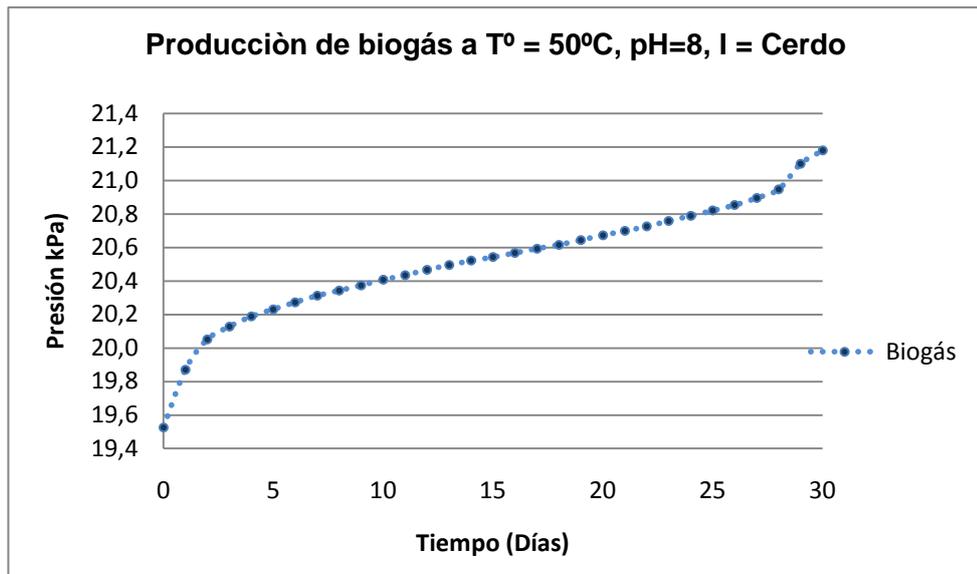


Gráfico 7.16.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento N° 16)

7.1.16.1 Interpretación: experimento N° 16

Mediante el análisis de los datos obtenidos durante el proceso se pudo constatar que el aumento de presión fue de 1,65 kPa. La fermentación sufre un proceso aletargado donde los microorganismos tienen una pequeña actividad enzimática y la producción de biogás es reducida, el incremento es mucho menor que el obtenido en el experimento de las mismas condiciones pero con pH = 6.

7.2 Experimento CERO

Como último paso del diseño experimental se desarrolló un ensayo de prueba o también llamado Prueba patrón (Experimento “cero”), el cual consiste en obtener resultados con los mejores parámetros de producción de biogás y así tener una base para comparar con los resultados obtenidos en la matriz experimental.

Las mejores condiciones son: pH neutro (7), temperatura corporal (37°C), tipo de inóculo; excretas de vaca y un tiempo de retención de 15 días (0,5 de mes). El resultado obtenido será en este caso la variación de presión, como se explicó anteriormente es la medida relativa de producción de biogás, este valor será tomado como un 100% de producción en relación a la producción obtenida por los diferentes experimentos realizados en la matriz.

Esta prueba se desarrolló por duplicado, a continuación en la Tabla 7.35, se presentan los datos de uno de los experimentos realizados ya que los dos tuvieron resultados similares de producción de biogás con condiciones controladas, (ver la Tabla 7.36).

Tabla 7.35.- Condiciones de experimentación de la carga de referencia.

pH	Temperatura	T. de retención	Inóculo	T°. media	P. inicial
7	37°C	15 días (0,5 mes)	Res	36,9	26,33

Tabla 7.36.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento CERO).

Producción de Biogás		
Tiempo (días)	Δ Presión (kPa)	T. media
0	26,33	36,2
1	50,08	36,8
2	59,27	36,6
3	63,50	37,2
4	66,52	37,0
5	69,13	37,0
6	71,47	36,3
7	73,34	36,3
8	76,27	36,6
9	76,24	37,2
10	79,30	36,5
11	81,61	37,4
12	84,08	37,3
13	87,17	37,1
14	91,81	37,2
15	101,65	37,2

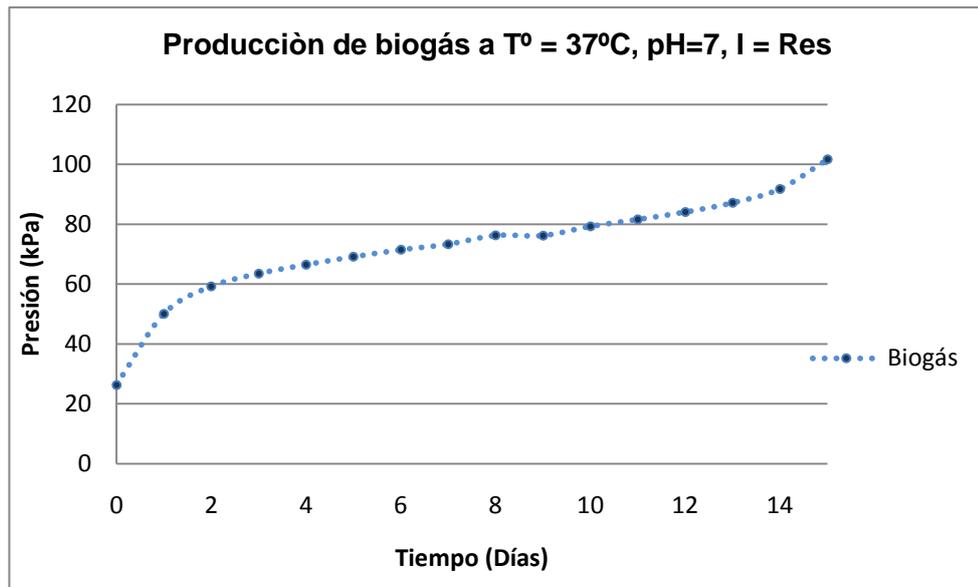


Gráfico 7.17.- Variación de presión vs. Tiempo (experimento CERO)

La curva de variación de presión muestra un incremento constante de la misma, el inóculo utilizado (Excretas de res) tiene una mayor actividad de degradación y producción de biogás, los microorganismos son más viables a temperaturas cercanas a la corporal y su crecimiento se ve acelerado gracias a la neutralidad del pH. El incremento final de Presión fue de 75,32 kPa. el cuál será la referencia para el cálculo de porcentaje de rendimiento de cada experimento realizado con anterioridad.

7.3 Tabla de resultados

A Continuación se expone la tabla de los resultados obtenidos de la matriz de experimentación del diseño 2^k , además se encuentra la columna de la presión corregida, este cálculo se realizó debido a que los datos de presión resultantes de la fermentación son tomados como gas noble, lo cual es incorrecto. La fórmula en para esta corrección se puede observar en Ec.7.1 y sus términos representan:

- P_1 = Presión obtenida
- $T_{\text{corregida}} = 273 \text{ K.} + 25^{\circ}\text{C.}$
- T_1 = Temperatura de estudio.

$$P_{\text{corregida}} = \frac{(P_1 * T_{\text{corregida}})}{(T_1 + 273K)}$$

Ec. 7.1.- Fórmula para la corrección de los valores de presión.

Tabla 7.37.- Resultados de la variación de presión.

Nº exp.	Inóculo	Tº	t. perm.	pH	Resultado (kPa)	Presión (kPa)
1	Trucha	20	0,25	6	0,30	0,31
2	Cerdo	20	0,25	6	0,20	0,20
3	Trucha	50	0,25	6	9,15	8,44
4	Cerdo	50	0,25	6	5,48	5,06
5	Trucha	20	1	6	7,90	8,03
6	Cerdo	20	1	6	15,90	16,17
7	Trucha	50	1	6	9,20	8,49
8	Cerdo	50	1	6	5,80	5,35
9	Trucha	20	0,25	8	0,20	0,20
10	Cerdo	20	0,25	8	0,30	0,31
11	Trucha	50	0,25	8	11,37	10,49
12	Cerdo	50	0,25	8	1,32	1,22
13	Trucha	20	1	8	5,60	5,70
14	Cerdo	20	1	8	13,60	13,83
15	Trucha	50	1	8	4,90	4,52
16	Cerdo	50	1	8	1,65	1,52
17	Res	37	0,50	7	75,32	72,40

7.4 Interacción de las variables (Método de los mínimos cuadrados)

Los cuatro parámetros de experimentación han sido nombrados con una X para crear la matriz. X_1 = Tipo de inóculo, X_2 = Temperatura, X_3 = Tiempo de permanencia, X_4 = Potencial hidronio (pH)

7.5 Rendimientos

El rendimiento se calculó con respecto al experimento realizado con las mejores condiciones, a continuación se expone la tabla de presión corregida y el rendimiento que le corresponde:

Tabla 7.39.- Rendimiento individual de los experimentos.

Nº	Presiones (kPa)	Rendimiento (%)
1	0,31	0,42
2	0,20	0,28
3	8,44	11,66
4	5,06	6,98
5	8,03	11,10
6	16,17	22,33
7	8,49	11,72
8	5,35	7,39
9	0,20	0,28
10	0,31	0,42
11	10,49	14,49
12	1,22	1,68
13	5,70	7,87
14	13,83	19,10
15	4,52	6,24
16	1,52	2,10
17	72,40	100,00

Tras la experimentación en laboratorio de la producción de biogás mediante la fermentación de residuos orgánicos, y utilizando como inóculo excretas de animales, se pudo obtener que el mejor rendimiento presenta las excretas de cerdo (22.33%), ya que muestran mayor producción de gas a temperatura ambiente.

Para el estudio del mejoramiento de producción de biogás a partir de desechos orgánicos se aplicó el análisis de mínimos cuadrados para proyectar la influencia que tienen cada una de las variables sobre la producción y de qué manera actúan sobre las demás variables, a continuación se muestra el cuadro de resultados.

7.6 Resultados de la interacción de variables (Efectos)

Las variables o factores que se estudiaron en el diseño experimental son de gran importancia en el proceso en estudio, sin embargo, cada una de ellas interactúa durante el desarrollo de la experimentación, por esta razón necesitamos saber con qué importancia y en qué orden de interacción causarían una mejora en la fermentación anaerobia. Para el cálculo de los efectos, como ya se explica con anterioridad, se utilizó el método de mínimos cuadrados para conocer la interacción entre las variables utilizando la matriz de experimentación y los resultados de rendimiento obtenidos, estos se muestran en la Tabla 7.40.

Tabla 7.40.- Efecto de las interacciones.

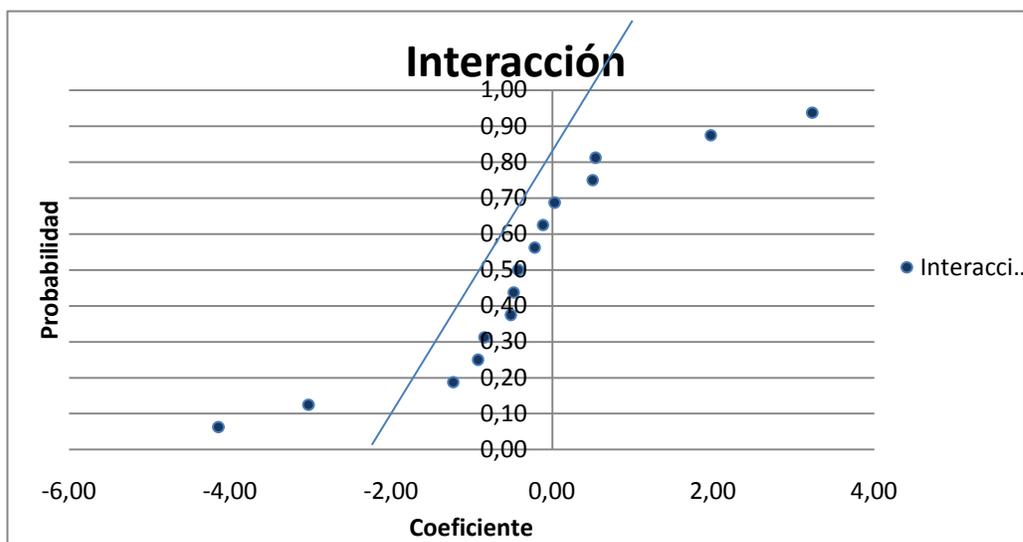
Variables	Significancia
Inóculo	-0,217557351
Temperatura	0,02905893
t. permanencia	3,22781874
pH	-1,2313065
Inó x T°	-3,0269585
Inó x t. per	1,967752304
Inó x pH	-0,478595731
T° x t. per	-4,1468593
T° x pH	-0,42360366
t. per x pH	-0,922305
Inó x T° x t. per	-0,841648859
Inó x T° x pH	-0,513713245
Inó x t. per x pH	0,5024876
T° x t. per x pH	-0,114602149
Inó x T° x t. per x pH	0,537605115
E. Base	7,75491212

7.7 Principales efectos

Como resultado de la linealización de los datos obtenidos en la interacción de los principales factores se obtuvo los principales efectos expuestos en la tabla 7.41, también, en el gráfico de interpretación 7.18 o papel normal plot, se puede observar los factores que más influencia causan en el proceso de producción de biogás, los datos que más se alejan de la media son los puntos que nos interesan, debido a que si estos se alejan más de la media mayor en su influencia sobre el rendimiento de producción. Los resultados serán profundamente analizados en las conclusiones.

Tabla 7.41.- Cuadro de datos para normal Plot.

Variable	Coefficiente (X)	Probabilidad (Y)
T° x t. per	-4,1469	0,063
ino x T°	-3,0270	0,125
pH	-1,2313	0,188
t. per x pH	-0,9223	0,250
Ino x T° x t. per	-0,8416	0,313
Ino x T° x pH	-0,5137	0,375
Ino x pH	-0,4786	0,438
T° x pH	-0,4236	0,500
Inóculo	-0,2176	0,563
T° x t. per x pH	-0,1146	0,625
Temperatura	0,0291	0,688
Ino x t. per x pH	0,5025	0,750
Ino x T° x t. per x pH	0,5376	0,813
Ino x t. per	1,9678	0,875
t. permanencia	3,2278	0,938

Gráfico de interacción**Gráfico 7.18.-** Interacción.

7.8 Prueba piloto

La prueba piloto se realizó en el equipo biodigestor construido para dicho fin. Los parámetros que se utilizaron para correr con esta prueba, fueron los que mejores resultados con respecto al aumento de presión, en este caso el experimento número 6, cuyos parámetros fueron:

- Tipo de inóculo: excretas de cerdo.
- Tiempo de permanencia: 30 días.
- Temperatura: ambiente (20°C).
- pH: 6.

En la Tabla 7.41 se aprecia la diferencia de presión a través del tiempo de permanencia junto con la temperatura a la que se realizó esta prueba, mientras que en la gráfica 7.19 se muestra la variación gráfica de la presión que se presentó en el biodigestor.

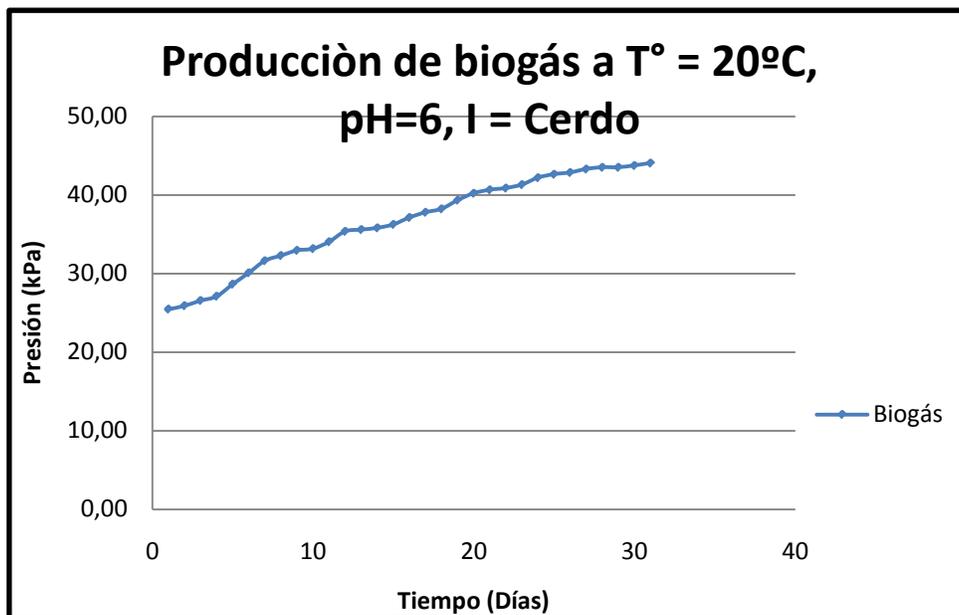


Gráfico 7.19.- Variación de presión vs. Tiempo (prueba piloto)

Tabla 7.42.- Variación de presión vs. Tiempo (prueba piloto).

Producción de Biogás		
<i>Tiempo (días)</i>	Δ <i>Presión (kPa)</i>	<i>T. media</i>
0	25,48	18,77
1	25,92	18,82
2	26,58	18,14
3	27,12	19,89
4	28,67	19,88
5	30,11	19,24
6	31,65	20,84
7	32,31	20,07
8	32,97	19,55
9	33,19	19,38
10	34,07	19,56
11	35,39	19,42
12	35,61	19,48
13	35,84	19,53
14	36,28	19,30
15	37,16	19,57
16	37,82	19,51
17	38,26	19,45
18	39,36	19,48
19	40,24	19,34
20	40,68	19,46
21	40,90	19,31
22	41,34	19,55
23	42,22	19,53
24	42,66	19,50
25	42,89	19,44
26	43,33	19,50
27	43,55	19,51
28	43,55	19,39
29	43,78	19,37
30	44,09	19,29

Como se puede apreciar en la curva, existe un aumento de presión hasta el día 25, donde la presión se mantiene casi constante hasta el día final de la prueba, notándose apenas un leve aumento; con lo que se puede concluir que después del día 25 existe apenas una mínima producción de biogás, debido al consumo completo de la materia orgánica por los microorganismos presentes.

En esta prueba además se observó que el aumento de presión fue más regular que el experimento N° 6, debido a que en la prueba piloto se empleó un sistema de volteo de materia orgánica, lo que impide que los microorganismos implicados en la fermentación, se queden sin los nutrientes de la materia sin consumir.

CONCLUSIONES

Como se puede observar en el cálculo de los efectos, son cuatro las variables de mayor influencia en la producción de biogás, dentro de las cuales se encuentra un efecto principal y tres interacciones dobles o efectos secundarios.

El principal efecto que se pudo calcular fue el tiempo de permanencia (3,2278), además, es el punto más distante en la gráfica de Plots (Figura 7.18). La variación del tiempo influye de manera importante un proceso de producción de biogás, al analizar la gráfica de Plots se puede observar que al disminuir el tiempo de permanencia a 7 días (-1), el rendimiento del proceso desciende, debido a que mientras se reduce el tiempo, también se reduce la distancia del efecto hacia la media normal ($m=0$). Por el contrario, si el tiempo se aumenta a 30 días (+1), el efecto crece y su influencia sobre el proceso aumenta. Sin embargo, como veremos en las siguientes interacciones dobles, el tiempo también depende de otras variables.

La relación tiempo de permanencia y temperatura (T°) juegan un papel importante en proceso de biodegradación de materia orgánica, es así que, mientras más alta es la temperatura el proceso puede reducir los tiempos de producción, así como puede entorpecer un proceso. En la producción de biogás la temperatura juega un papel importante, las altas temperaturas 50°C (+1) produjeron un retraso de producción de biogás debido a que gran parte de los microorganismos presentes en la fermentación no son termo resistentes, razón por la cual el proceso se estancó. Al mantener la temperatura constante de 20°C (-1), el rendimiento aumentará si el tiempo es aumentado de 7 días (-1) a 30 días (+1), así mismo al disminuir el tiempo de permanencia de +1 a -1 con temperaturas elevadas (50°C) el rendimiento aumentará, por lo que se puede sacar de conclusión que el tiempo de permanencia y la temperatura son inversamente proporcionales.

El comportamiento de un inóculo determinado dependerá sustancialmente de la temperatura, en el caso de los inóculos utilizados en la experimentación presente, el inóculo de menor actividad (-1) fue las vísceras de trucha que al analizar su interacción con la temperatura, se encuentra que actúa mejor a temperaturas bajas debido a que al bajar la temperatura de 50°C (+1) a 20°C (-1) el rendimiento del proceso mejora porque el efecto aumenta de valor, sin embargo el inóculo +1 o de cerdo también muestra una mejora de rendimiento al trabajar con temperaturas bajas o de ambiente. Como se pudo observar en el rendimiento de los experimentos el mejor resultado lo obtuvo el experimento de condiciones normales e inóculo de cerdo.

La última interacción de importancia fue el tiempo de permanencia y el inóculo. Al cambiar el inóculo de trucha (-1) a inóculo de cerdo (+1) con un tiempo de permanencia de 30 días el proceso muestra un rendimiento más importante que los otros tratamientos, debido a que el efecto causado es de gran importancia en la gráfica.

BIBLIOGRAFÍA

CARLILE J. C.. GOODDAY G. W.. WATKINSON S.C. The Fungi Segunda Edición. USA. Editorial Elsevier. 2001. 491 páginas.

FERRÉ, Joan. RIUS, Xavier. Introducción al Diseño Estadístico Experimentos Primera Edición. Italia. Editorial Imperial Tarraco. 50 páginas.

GUTIÉRREZ, Humberto. DE LA VARA, Román. Análisis y Diseño de Experimentos Primera Edición. Editorial Mc Graw – Hill. 2004. 571 páginas.

KRAUS, Gabriele. TEGA, Ernesto. Bioenergie: aspetti biochimici e microbiologici della fermentazione anaeróbica Primera Edición. Ecuador: Editoriale Nuova Brianza. 1988. 71 páginas.

RENNENBERG Richard. Biotechnology for beginners Primera edición. Alemania. Editorial Elsevier. 2008. 274 páginas.

SCHOMBURG, Gerhard. Gas Chromatography, A Practical Course Tercera Edición. Alemania. Editorial VCH. 1990. 296 páginas.

WALKER, J. N.. RATLEY, R.. Molecular Biotechnology Cuarta Edición. USA. Editorial Athenacum Press Ltd. 2006. 382 páginas.

TODESCHINI, Roberto. BALLABIO, Davide. CONSONNI, Viviana. MAURI, Andrea. PAVAN, Manuela. La Metodologia della Riserca Sperimentale Primera Edición. Italia. Editorial Università degli Sstudi di Milano-Bicocla. 2006. 355 páginas.

Referencias Electrónicas

HERMIDA Orestes; LÓPEZ Lisbet. Diseño y evaluación de un biodigestor para obtener gas metano y biofertilizante a partir de la fermentación de cachaza y residuos agropecuarios. Cuba, 2005, <http://www.energia.inf.cu>, [07/11/2009].

Instituto Nacional de Ingeniería Agropecuaria, Manual para la producción de biogás, Argentina, 2001, <http://www.inta.gov.ar/iir/info/matriz.htm>, [06/11/09].

JIMÉNEZ Manuel. Biodigestor.- digestor de desechos orgánicos simple, Republica Dominicana, 2008, <http://www.arqhys.com/construcciones/biodigestor-digestor-desechos.html>, [06/11/2009].

MERCHUK José, Microbiología Industrial, Argentina, 2005, <http://www.biologia.edu.ar/microind/pr%C3%B3logo.htm>, [06/01/10].

Olimpiadas Nacionales de contenido educativo en Internet, Producción de biogás. Argentina, 2004, <http://www.oni.escuelas.edu.ar>, [07/11/2009].

SOLARI Giannina. Ficha técnica de biodigestores. Perú, 2004 <http://www.itdg.org.pe/fichastecnicas/pdf/FichaTecnica8-Biodigestores.pdf>, [06/11/2009].

SOSA R., CHAO R. y DEL RÍO J., Aspectos bioquímicos y tecnológicos del tratamiento de residuales agrícolas con producción de biogás, Venezuela, 2000, <http://www.sian.info.ve/porcinos/publicaciones/rccpn/rev62/RCP62art1.htm>, [07/11/09].

IPARRAGUIRRE Jorge, Tecnologías sostenibles para la gestión de residuos en Ventanilla y Aprovechamiento energético del Biogás, Lima, 2005, http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4365/1/PFC_MGA_memoria.pdf, [06/11/2009].

Thermo Scientific, Especificaciones del producto, Estados Unidos, 2008, http://www.barnsteadthermolyne.com/eThermo/CMA/PDFs/Product/productPDF_6903.pdf, [10/12/2009].

ANEXO 1.

Se adjunta a continuación la lista de materiales obtenida del reporte de prótel.

Part Type	Designator	Footprint	Description
1BQ40	D1	D-38R	Diode Bridge
1BQ40	D2	D-38R	Diode Bridge
1N4007	D3	DIODE-0.4 ^a	Diode
1N4007	D4	DIODE-0.4 ^a	Diode
1k	R11	AXIAL-0.5	Resistor
2N2222A	Q4	TO-92C	NPN BJT
2N2222A	Q5	TO-92C	NPN BJT
10k	R7	AXIAL-0.4	Resistor
10k	R1	AXIAL-0.4	Resistor
10k	R2	AXIAL-0.4	Resistor
10k	R8	AXIAL-0.4	Resistor
10k	R9	AXIAL-0.4	Resistor
10k	R6	AXIAL-0.4	Resistor
12VSPDT	RLY4	RELE	SPDT Relay
12VSPDT	RLY3	RELE	SPDT Relay
22k	R4	AXIAL-0.4	Resistor
22k	R5	AXIAL-0.4	Resistor
78L12	U8	TO-220H	3-Terminal Positive Voltage Regulator
78L12	U9	TO-220H	3-Terminal Positive Voltage Regulator
79L12	U10	TO-220H	3-Terminal Positive Voltage Regulator
79L12	U11	TO-220H	3-Terminal Positive Voltage Regulator
220	R10	AXIAL-0.4	Resistor
470	R3	AXIAL-0.4	Resistor
470	R12	AXIAL-0.5	Resistor
470u	C5	C1000UF	Bi-Polar Capacitor

470u	C6	C1000UF	Bi-Polar Capacitor
470u	C8	C1000UF	Bi-Polar Capacitor
470u	C7	C1000UF	Bi-Polar Capacitor
AD620AN (8)	U13	DIP-8	Precision Instrumentation Amplifier
BTA26- 600B	Q6	TO-247	Triac
CAP	C11	RAD-0.2	Capacitor
CAP	C9	RAD-0.2	Capacitor
CAP	C10	RAD-0.2	Capacitor
CON2	J4	AZUL5-2	Connector
CON2	J5	AZUL5-2	Connector
CON2	J1	AZUL5-2	Connector
CON2	J13	AZUL5-2	Connector
CON2	J3	AZUL5-2	Connector
CON2	J2	AZUL5-2	Connector
CON2	J12	AZUL5-2	Connector
CON3	J9	AZUL5-3	Connector
CON4	J6	AZUL5-4	Connector
CON6	J8	AZUL5-6	Connector
MOC3062	U14	DIP-6	
TL082	U2	DIP-8	JFET-Input Operational Amplifiers
TL082	U1	DIP-8	JFET-Input Operational Amplifiers
TL082	U12	DIP-8	JFET-Input Operational Amplifiers

ANEXO 2

Funciones y Puertos del equipo.

En la carcasa del equipo se colocó la tarjeta de control del equipo, que conectada al DAQ nos permite la comunicación con la computadora, por ende se encuentran los puertos analógicos y digitales de comunicación.

A continuación se puede observar la representación de la carcasa principal, junto con la ubicación de los elementos y de descripción de los mismos.



Figura A2.1 Presentación de la carcasa principal y ubicación de elementos

Fuente de Alimentación

Nos permite alimentar el equipo y sus componentes con el voltaje requerido.

1. La primera fuente es de potencia
2. La segunda fuente es para los sensores

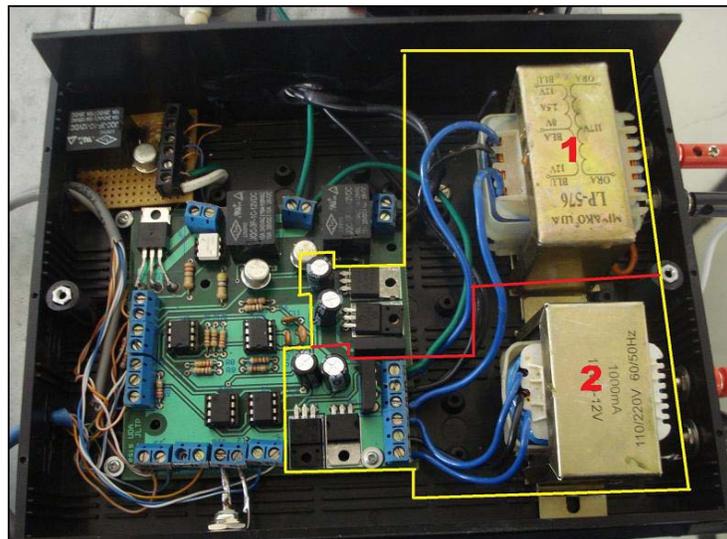


Figura A2.2 Ubicación física del circuito en la placa

Entrada de los Actuadores

3. Electroválvula
4. Niquelina
5. Motor



Figura A2.3 Ubicación física del circuito en la placa

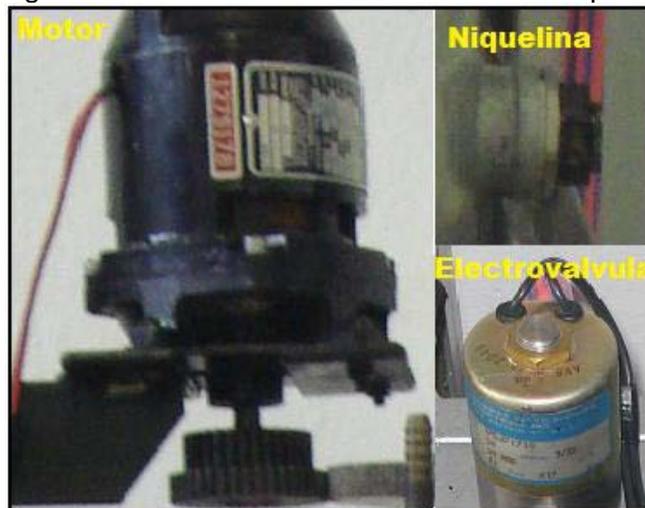


Figura A2.4 Presentación física de los actuadores

Entrada de Sensores

Nos permite conectar los sensores a la placa, se utilizó bornera, el cable utilizado está codificado por colores lo que nos facilita la conexión de los sensores.

6. Presión
7. PH
8. Temperatura

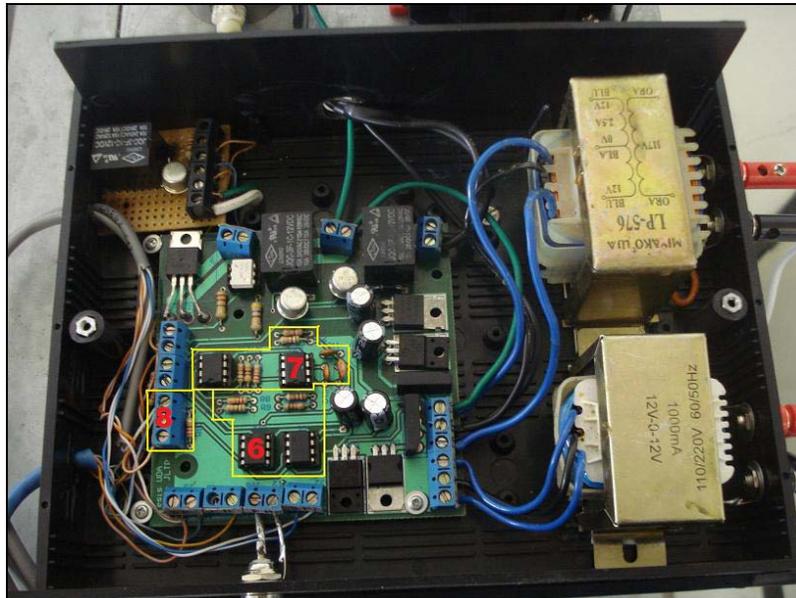


Figura A2.5 Ubicación física del circuito en la placa



Figura A2.6 Presentación física de los Sensores

Salida de Sensores / Actuadores

La salida de los sensores y actuadores van conectados con un cable entre la placa y el módulo de adquisición de datos DAQ, para ser conectados en los puertos analógicos y digitales respectivamente.