

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



“Prototipo de Biodigestor para Aguas Residuales para la  
Generación de Biogás”

Megaproyecto realizado por:

Clara Lucía del Rosario Arias Morales

José Guillermo López González

Licenciatura en Ingeniería Industrial –

Edgar Rolando Obregón Morales

Licenciatura en Ingeniería Mecánica –

Diego Javier Castillo Sagastume

Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica –

María Fernanda Barrera Ortiz

Licenciatura en Ingeniería Química –

Guatemala

2011



“Prototipo de Biodigestor para Aguas Residuales para la  
Generación de Biogás”

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE  
GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Megaproyecto

“Prototipo de Biodigestor para Aguas Residuales para la  
Generación de Biogás”

Megaproyecto realizado por:

Clara Lucía del Rosario Arias Morales

José Guillermo López González

Licenciatura en Ingeniería Industrial –

Edgar Rolando Obregón Morales

Licenciatura en Ingeniería Mecánica –

Diego Javier Castillo Sagastume

Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica –


María Fernanda Barrera Ortiz

Licenciatura en Ingeniería Química -

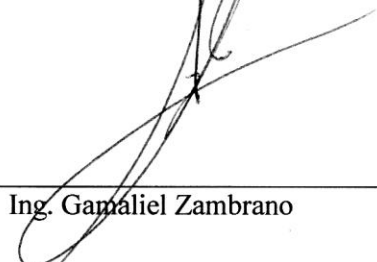
Guatemala  
2011

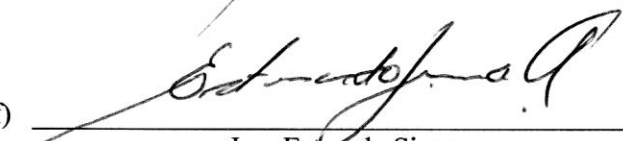



Vo. Bo. :

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Víctor Ayerdi

Tribunal Examinador:

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Gamaliel Zambrano

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Estuardo Sierra

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Roberto Delgado

Fecha de aprobación: Guatemala, 30 de noviembre de 2011

## PREFACIO

La finalidad inicial de la presente investigación se enfocó en el aprovechamiento del potencial energético que poseen ciertos desechos de las actividades humanas, para la generación de biogás y por medio de su utilización reducir costos de operación de la Universidad del Valle de Guatemala. Inicialmente, se pretendía captar el biogás que poseían los desechos sólidos orgánicos de la Universidad, dentro de los que se encuentran los desechos de jardinería y de restos alimenticios.

Sin embargo, se estableció que los desechos sólidos orgánicos generados en la Universidad no tenían el potencial energético necesario, por su bajo volumen. Razón por la cual, se reorientó la investigación hacia el aprovechamiento del potencial de las aguas residuales de la Universidad, para la generación de biogás.

Como primer paso para determinar el potencial energético de las aguas residuales, se hicieron pruebas piloto, almacenando un volumen específico de aguas residuales, las cuales mostraron un potencial adecuado para continuar con la investigación.

Posteriormente, se diseñaron y construyeron tres prototipos con distintas condiciones de operación (condiciones normales, enriquecimiento del sustrato y modificación de la temperatura), para definir bajo qué condiciones se generaba mayor producción de biogás. Se instaló un control digital para el control de la temperatura de los prototipos. Se definieron los requerimientos de seguridad industrial para prevención de accidentes y se realizaron mediciones periódicas de la generación de biogás.

Finalmente, se realizó una proyección de los costos de inversión para fabricar un Biodigestor con capacidad para el aprovechamiento de las aguas residuales generadas en la Universidad, con el objetivo de definir su potencial energético, de acuerdo a la generación de biogás registrada en la simulación, se le asignó la aplicación de generación de energía y se determinó la factibilidad financiera analizando varios escenarios.

## CONTENIDO

<i>PREFACIO</i> .....	<i>v</i>
<i>CONTENIDO</i> .....	<i>vi</i>
<i>LISTA DE TABLAS</i> .....	<i>xii</i>
<i>LISTA DE ILUSTRACIONES</i> .....	<i>xvi</i>
<i>LISTA DE GRÁFICAS</i> .....	<i>xxi</i>
<i>LISTA DE ECUACIONES</i> .....	<i>xxii</i>
<i>RESUMEN</i> .....	<i>xxiv</i>
<i>I. INTRODUCCIÓN</i> .....	<i>1</i>
<i>II. ANTECEDENTES</i> .....	<i>3</i>
<i>A. Taller de Metal-Mecánica de la Universidad del Valle de Guatemala:</i> .....	<i>3</i>
1. <i>Instalaciones.</i> .....	<i>3</i>
2. <i>Distribución de las instalaciones.</i> .....	<i>3</i>
3. <i>Población.</i> .....	<i>3</i>
4. <i>Beneficios del sector.</i> .....	<i>4</i>
<i>B. Universidad del Valle de Guatemala:</i> .....	<i>4</i>
1. <i>Instalaciones.</i> .....	<i>4</i>
2. <i>Distribución de las instalaciones.</i> .....	<i>4</i>
3. <i>Población.</i> .....	<i>5</i>
4. <i>Consumo eléctrico de la Universidad.</i> .....	<i>6</i>
5. <i>Inversiones de la Universidad.</i> .....	<i>7</i>
6. <i>Apoyo de instituciones.</i> .....	<i>7</i>

III. MARCO TEÓRICO .....	9
A. Digestión anaeróbica .....	9
1. Etapa 1: Rompimiento de polímeros .....	10
2. Etapa 2: Producción de ácidos.....	11
3. Etapa 3: Producción de metano. ....	11
B. Biodigestores.....	14
1. Según su forma de alimentación: .....	16
2. Según la temperatura de operación: .....	17
3. Según el número de etapas:.....	17
4. Ventajas medioambientales:.....	18
5. Ventajas económicas:.....	18
C. Resistencia de materiales .....	18
1. Esfuerzo.....	19
2. Vigas. ....	21
3. Columnas .....	22
4. Recipientes presurizados.....	23
5. Conchas cónicas.....	25
D. Mecánica de fluidos .....	25
1. Tubería.....	28
E. Control de temperatura y medición de presión en Biodigestores .....	35
1. Sensores.....	35
2. Sensor de temperatura RTD. ....	36
3. Pt100.....	38
4. Sensor de presión. ....	40

5.	<i>Aumento de temperatura en Biodigestor.</i>	41
F.	<i>Biogás</i>	42
1.	<i>Generación promedio por m<sup>3</sup> de aguas residuales.</i>	44
G.	<i>Cromatografía de gases</i>	45
1.	<i>Sistema de gas portador.</i>	46
2.	<i>La columna y hornos para la columna</i>	46
3.	<i>Sistemas de detección.</i>	47
H.	<i>Fosas sépticas</i>	47
1.	<i>Función</i>	48
2.	<i>Diseño.</i>	48
3.	<i>Limpieza.</i>	48
I.	<i>Demanda Bioquímica de Oxígeno</i>	48
1.	<i>Medidor de oxígeno LBOD101 IntelliCAL®.</i>	50
J.	<i>Seguridad industrial</i>	50
1.	<i>Riesgos biológicos.</i>	50
2.	<i>Riesgos mecánicos.</i>	51
3.	<i>Riesgos de explosión.</i>	53
4.	<i>Riesgos eléctricos.</i>	53
K.	<i>Estimación de costos de proyectos:</i>	54
L.	<i>Análisis financiero:</i>	55
1.	<i>Tasa de interés</i>	55
2.	<i>Análisis de valor presente.</i>	55
I.	<i>JUSTIFICACIÓN</i>	57
IV.	<i>OBJETIVOS</i>	58

A.	General.....	58
B.	Específicos.....	58
V.	DESARROLLO.....	59
A.	Módulo de diseño y desarrollo del prototipo:.....	59
1.	Reconocimiento de la necesidad.....	59
2.	Definición del problema.....	59
3.	Síntesis.....	59
4.	Diseño cámara de carga:.....	68
5.	Diseño Biodigestor.....	69
6.	Diseño del gasómetro.....	72
7.	Diseño de la tubería.....	74
8.	Diseño tubería de gas.....	76
9.	Análisis y optimización.....	77
10.	Evaluación.....	77
B.	Módulo de fabricación, instalación y mantenimiento del prototipo:.....	78
1.	Fabricación e instalación.....	78
2.	Cámaras de digestión.....	83
3.	Estructura de madera.....	87
4.	Sistema de transporte de sustrato.....	101
5.	Cámara de almacenamiento de gas.....	107
6.	Sistema de transporte de gas.....	121
7.	Cámara de carga.....	124
8.	Funcionamiento del prototipo.....	129
9.	Operación.....	136

10.	Finalización de funcionamiento.....	137
11.	Mantenimiento .....	139
C.	Módulo de Mecatrónica.....	141
1.	Medición y calibración de temperatura.....	141
2.	Medición y calibración de presión.....	146
3.	Control de temperatura en Biodigestor #3.....	148
4.	Diseño e implementación de circuitos electrónicos.....	152
D.	Módulo de control de calidad y seguridad industrial: .....	156
1.	Análisis de seguridad industrial del proceso de biodigestión.....	156
2.	Riesgos.....	157
3.	Señalización de los alrededores.....	163
4.	Informe instructivo para enseñar buenas prácticas de un Biodigestor.....	164
5.	Proceso a seguir para el manejo del Biodigestor .....	165
6.	Vaciado de los contenedores.....	170
7.	Guía para la correcta operación del Biodigestor.....	173
8.	¿Cómo realizar las mediciones? .....	175
9.	Estándares de calidad.....	177
10.	Divulgar y comunicar los resultados.....	188
11.	Presentar los resultados a las autoridades de la Universidad.....	190
E.	Módulo de Química:.....	191
F.	Módulo de factibilidad financiera:.....	198
1.	Prototipo de Biodigestor:.....	198
2.	Definición de costos de los Biodigestores: .....	201
3.	Resultados de generación de biogás: .....	204

4. Factibilidad del aprovechamiento de aguas residuales de la Universidad del Valle de Guatemala. ....	205
VI. CONCLUSIONES .....	218
VII. RECOMENDACIONES .....	220
VIII. BIBLIOGRAFÍA.....	223
IX. Anexos .....	229
A. Situación actual del sector donde se instalaron los prototipos de Biodigestor .....	229
B. Aplicación asignada al biogás generado por los prototipos: .....	230
C. Análisis de factibilidad financiera de quemador de 5 cm .....	231
1. Condiciones teóricas de generación.....	232
2. Condiciones teóricas de generación con reducción en costos de operación. ....	232
3. Condiciones teóricas de generación duplicadas con reducción en costos de operación.....	234
D. Diagrama general del proceso: .....	236
E. Datos originales.....	237
F. Cálculos de muestra .....	246
G. Datos calculados.....	250
H. Cromatogramas .....	254

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Consumo eléctrico en kWh para el año 2010.....	6
Tabla 2: Consumo eléctrico en kWh para el año 2011.....	7
Tabla 3: Comparación entre metabolismo aeróbico y anaeróbico.....	9
Tabla 4: Componentes de las aguas residuales .....	10
Tabla 5: Parámetros a controlar durante la digestión anaerobia .....	13
Tabla 6: Propiedades físicas del PVC.....	32
Tabla 7: Materiales comunes para RTD .....	37
Tabla 8: Valores estándar resistencia para PT100.....	38
Tabla 9: Características del biogás .....	42
Tabla 10: Composición del biogás producido a partir de aguas residuales .....	43
Tabla 11. Efecto de los componentes del biogás .....	44
Tabla 12: Aplicaciones frecuentes para el biogás y sus ritmos de consumo .....	45
Tabla 13: Detectores característicos para cromatografía de gases .....	47
Tabla 14: Diluciones recomendadas para diferentes valores esperados de DBO .....	49
Tabla 15: Cálculo de esfuerzos últimos para vigas.....	66
Tabla 16: Cálculo de esfuerzos últimos para columnas. ....	67
Tabla 17: Esfuerzos internos en cilindros presurizados. ....	71
Tabla 18: Esfuerzos internos en conos presurizados.....	71
Tabla 19: Esfuerzos en roscas.....	72
Tabla 20: Producción de biogás en prototipos pequeños. ....	73
Tabla 21: Propiedades y coeficientes de pérdida del sistema de tuberías.....	75
Tabla 22: cálculo de caudal, pérdidas y tiempo de llenado. ....	76
Tabla 23: Longitudes de vigas para estructura de madera.....	88
Tabla 24: Longitudes de columnas para estructura de madera.....	88
Tabla 25: Colocación de empalmes en vigas para estructura de madera.....	91
Tabla 26: Colocación de empalmes en columnas para estructura de madera.....	92
Tabla 27: Peso de elementos de Biodigestor.....	100

Tabla 28: Esfuerzo cortante máximo soportado por perno.....	100
Tabla 29: Cálculo de presión para contenedor de 20 galones .....	116
Tabla 30: Cálculo de presión para contenedor de 130 litros .....	116
Tabla 31: Cálculo de viga empotrada para guía PVC .....	119
Tabla 32: Parámetros de mantenimiento.....	140
Tabla 33: Linealización de Pt100 .....	143
Tabla 34: Propiedades de los elementos del Biodigestor #3 .....	149
Tabla 35: Propiedades resistencias eléctricas.....	149
Tabla 36: Enfermedades más comunes causadas por aguas residuales. ....	159
Tabla 37: Resumen proceso de llenado inicial.....	166
Tabla 38: Resumen proceso de operación y muestreo. ....	169
Tabla 39: Resumen proceso de vaciado .....	171
Tabla 40: Formato para el llenado inicial del depósito y los contenedores .....	179
Tabla 41: Formato para verificar la operación normal.....	180
Tabla 42: Formato para la toma de mediciones .....	181
Tabla 43: Intervalos de calidad establecidos por el grupo.....	182
Tabla 44: Tarjeta Kanban para el contenedor depósito .....	184
Tabla 45: Tarjeta Kanban para el contenedor 1 .....	184
Tabla 46: Tarjeta Kanban para el contenedor 2 .....	185
Tabla 47: Tarjeta Kanban para el contenedor 3 .....	185
Tabla 48: Remoción de sólidos totales .....	193
Tabla 49: Promedio y desviación del pH cada tercer día .....	194
Tabla 50: Presión promedio y desviación estándar en cada Biodigestor .....	197
Tabla 51: Área de cada pico en los cromatogramas de las muestras de biogás .....	198
Tabla 52: Costos de materia prima requerida para la elaboración de los prototipos .....	201
Tabla 53: Costo inicial según prototipo .....	202
Tabla 54: Costos de operación mensual por prototipo .....	203
Tabla 55: Generación diaria de biogás en prototipos .....	204
Tabla 56: Generación teórica de prototipos .....	205
Tabla 57: Estimado de personas que asisten a la Universidad diariamente.....	206

Tabla 58: Volumen teórico para la fosa séptica de la UVG .....	206
Tabla 59: Volumen mensual de lodos generados .....	207
Tabla 60: Volumen total y de llenado del Biodigestor.....	207
Tabla 61: Inversión inicial del Biodigestor.....	208
Tabla 62: Costos de operación mensual del Biodigestor.....	210
Tabla 63: Generación diaria de biogás de acuerdo a su tipo .....	210
Tabla 64: Beneficio económico de operar el generador eléctrico .....	212
Tabla 65: Flujo de efectivo mensual del proyecto .....	212
Tabla 66: Flujo de efectivo mensual del proyecto con reducción de costos.....	213
Tabla 67: Resumen de flujo de efectivo anual .....	214
Tabla 68: Flujo de efectivo mensual con reducción en costos y generación duplicada.....	215
Tabla 69: Flujos y costos modificados anuales.....	215
Tabla 70: VP del proyecto dados n años de funcionamiento .....	216
Tabla 71: Aplicación de quemador de 5 cm.....	231
Tabla 72: Resumen de inversión, costos e ingresos .....	232
Tabla 73: Resumen de inversión, costos modificados .....	233
Tabla 74: Análisis de VP.....	233
Tabla 75: Resumen de inversión (costos e ingresos modificados).....	234
Tabla 76: Análisis de VP.....	234
Tabla 77: VP dados los n meses transcurridos.....	235
Tabla 78: Mediciones diarias de presión de cada Biodigestor .....	237
Tabla 79: Mediciones diarias de temperatura de cada Biodigestor .....	239
Tabla 80: Mediciones diarias de la altura del medidor del gasómetro .....	241
Tabla 81: Mediciones de pH cada tercer día.....	242
Tabla 82: Fecha de toma, de la primera y de la segunda medición .....	243
Tabla 83: Oxígeno disuelto el primero y el quinto día para muestra del Biodigestor #1 .....	244
Tabla 84: Oxígeno disuelto el primero y el quinto día para muestra del Biodigestor #2.....	244
Tabla 85: Oxígeno disuelto el primero y el quinto día para muestra del Biodigestor #3.....	245
Tabla 86: Masas iniciales y finales de muestra para la determinación de TS.....	245
Tabla 87: DBO calculado para muestra del Biodigestor #1 .....	250

Tabla 88: DBO calculado para muestra del Biodigestor #2 .....	250
Tabla 89: DBO calculado para muestra del Biodigestor #3 .....	251
Tabla 90: TS a la entrada de los Biodigestores .....	251
Tabla 91: TS a la salida del Biodigestor #1 .....	251
Tabla 92: TS a la salida del Biodigestor #2 .....	252
Tabla 93: TS a la salida del Biodigestor #3 .....	252
Tabla 94: Volumen de biogás generado diario, acumulado y promedio .....	253

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Imagen aérea del Taller de Metalmecánica de la Universidad del Valle .....	3
Ilustración 2: Distribución de las instalaciones de la Universidad .....	5
Ilustración 3: Etapas de la digestión anaerobia .....	12
Ilustración 4: Esquema general de un Biodigestor .....	16
Ilustración 5: Deformación por tensión .....	19
Ilustración 6: Deformación por compresión .....	20
Ilustración 7: Deformación por corte .....	20
Ilustración 8: Deformación por flexión.....	21
Ilustración 9: Reacciones según soporte aplicado .....	22
Ilustración 10: Columnas en pandeo.....	23
Ilustración 11: Cilindro sometido a presión interna y externa.....	24
Ilustración 12: Coeficiente de pérdida por accesorio. ....	27
Ilustración 13: Válvula de Bola .....	29
Ilustración 14. Válvula de Diafragma .....	29
Ilustración 15. Válvula de Compuerta .....	30
Ilustración 16. Válvula de Mariposa.....	30
Ilustración 17. Válvula de Globo.....	31
Ilustración 18. Tubos para instalación de gas .....	34
Ilustración 19. Válvulas y uniones para distribución de gas .....	34
Ilustración 20. Símbolo RTD.....	36
Ilustración 21: Sensor RTD .....	38
Ilustración 22: Sensor PT100.....	39
Ilustración 23: Conexión a 2 hilos Pt100.....	39
Ilustración 24: Esquema interior sensores de presión .....	40
Ilustración 25: Sensor de presión #67CP662 .....	41
Ilustración 26: Medidor de oxígeno disuelto HQ40d con la sonda LBOD101 .....	50
Ilustración 27: Prototipo de tres tanques.....	60

Ilustración 28: Sistema de tres Biodigestores en serie. ....	61
Ilustración 29: Sistema de tres Biodigestores con cámara de carga. ....	62
Ilustración 30: Diagrama de clasificación de vigas.....	64
Ilustración 31: Diagrama de momento en vigas superiores.....	64
Ilustración 32: Diagrama de momento en viga superior de soporte de biorreactores. ....	65
Ilustración 33: Diagrama de momento en vigas medias.....	65
Ilustración 34: Diagrama de momento en vigas medias de soporte de los biorreactores. ....	66
Ilustración 35: Diagrama de clasificación de columnas. ....	67
Ilustración 36: Test de elementos finitos, de cargas sobre la estructura. ....	68
Ilustración 37: Biodigestor anaeróbico. ....	70
Ilustración 38. Diagrama de funcionamiento del gasómetro. ....	74
Ilustración 39: Diagrama de tubería de líquidos. ....	75
Ilustración 40: Diagrama de tubería de gas.....	77
Ilustración 41: Contenedor de 3.78 litros forrado y con parche .....	79
Ilustración 42: Llenado de prototipos .....	80
Ilustración 43: Equipo de protección .....	80
Ilustración 44. Prototipos colocados generando biogás .....	81
Ilustración 45. Prototipo Acoplado a Probeta .....	81
Ilustración 46: Válvula de llanta de automóvil adaptada a tapadera .....	82
Ilustración 47: Proceso de fabricación de tonel con cono excéntrico.....	84
Ilustración 48: Toneles modificados con su respectiva estructura de angular .....	85
Ilustración 49: Tapas de tonel.....	85
Ilustración 50: Sierra corta círculos y broca de paleta .....	88
Ilustración 51: Nomenclatura para vigas y columnas de estructura de madera .....	89
Ilustración 52: Diagrama 2 para nomenclatura para vigas y columnas de estructura .....	89
Ilustración 53: Diagrama 3 para nomenclatura para vigas y columnas de estructura .....	90
Ilustración 54: Medición de piezas de madera .....	90
Ilustración 55: Piezas de madera cortadas .....	91
Ilustración 56: Distancia entre empalmes de viga tipo VI.....	92
Ilustración 57: Distancia y colocación de empalmes en columna tipo i .....	92

Ilustración 58: Dimensiones de empalmes en extremo de viga o columna .....	93
Ilustración 59: Corte de empalme en parte intermedia de piezas de madera .....	93
Ilustración 60: Desprendimiento de Madera en Empalmes Intermedios .....	93
Ilustración 61: Ensamblaje para corte de columnas tipo ii .....	94
Ilustración 62: Columnas tipo ii cortadas y cazadas en ensamblaje .....	94
Ilustración 63: Colocación de agujeros para pernos a lo largo de vigas tipo II .....	95
Ilustración 64: Agujeros para pernos .....	95
Ilustración 65: Perno insertado en agujero para viga tipo II inferior .....	96
Ilustración 66: Ensamblaje de marco de columnas tipo i y vigas tipo I .....	96
Ilustración 67: Colocación de vigas tipo VI sobre vigas tipo V y tipo II .....	97
Ilustración 68: Columna Tipo iv Atornillada a Viga Tipo V .....	98
Ilustración 69: Estructura de madera terminada con toneles colocados .....	98
Ilustración 70: Teflón sobre roscas adaptadas a toneles .....	103
Ilustración 71: Llave de cadena .....	103
Ilustración 72: Corte de tubería PVC de 4" .....	103
Ilustración 73: Tubería PVC sin Cámara de Carga .....	104
Ilustración 74: Preparación de tubería PVC para ser ensamblada .....	104
Ilustración 75: Tubería PVC ensamblada con Cámara de Carga .....	105
Ilustración 76: Contenedor de 75 litros .....	107
Ilustración 77: Contenedor de 130 litros .....	107
Ilustración 78: Vista lateral para corte de contenedor .....	108
Ilustración 79: Boceto de vista lateral de molde para cemento .....	109
Ilustración 80: Boceto de vista de planta de corte de contenedor .....	109
Ilustración 81: Boceto de vista lateral para émbolo de cámara de almacenamiento de gas ..	110
Ilustración 82: Componentes de Gasómetro .....	110
Ilustración 83: Boceto de diagrama para verter cemento .....	111
Ilustración 84: Cámara de almacenamiento de gas .....	112
Ilustración 85: Marca de altura inicial de émbolo de cámara de almacenamiento de gas .....	112
Ilustración 86: Ángulo de incidencia de peso de cemento en gasómetro .....	117
Ilustración 87: Triángulo para Ángulo de Desviación Máximo de Émbolo de Gasómetro ...	117

Ilustración 88: Boceto de viga empotrada para guía PVC de gasómetro .....	118
Ilustración 89: Sistema llave de paso-manómetro.....	122
Ilustración 90: Llave de paso acoplada a salida de gas de cámara de digestión .....	123
Ilustración 91: Cruz de tubería de gas.....	123
Ilustración 92: Abrazadera de tornillo sin fin adaptada a manguera en salida de gas.....	123
Ilustración 93: Fosa séptica de 1100 litros .....	125
Ilustración 94: Escalera de acceso a la entrada de cámara de carga .....	125
Ilustración 95: Bomba de Drenado de Fosa Séptica.....	125
Ilustración 96: Bosquejo de Vista de Planta para Colocación de Fosa Séptica .....	126
Ilustración 97: Colocación de Fosa Séptica sobre Estructura de Madera .....	126
Ilustración 98: Colocación de llave PVC de 1 1/2" .....	127
Ilustración 99: Altura de tubería PVC.....	128
Ilustración 100: Fosa séptica montada sobre estructura de madera.....	128
Ilustración 101: Válvula de admisión de azúcar .....	130
Ilustración 102: Ubicación de cámara receptora de efluente.....	138
Ilustración 103: Diagrama de control de temperatura .....	142
Ilustración 104 - Circuito linealizador de Pt100 .....	143
Ilustración 105: Diagrama control de presión .....	146
Ilustración 106: Conexiones control de temperatura.....	150
Ilustración 107: Diagrama de bloques control de temperatura .....	151
Ilustración 108: Diseño PCB para linealización de las Pt100 .....	152
Ilustración 109: Implementación circuito linealizador de las Pt100.....	152
Ilustración 110: Diagrama esquemático circuito controlador.....	153
Ilustración 111: Diseño PCB circuito controlador .....	153
Ilustración 112: Implementación circuito controlador de temperatura.....	153
Ilustración 113: Diseño PCB circuito controlador .....	154
Ilustración 114: Implementación circuito controlador .....	155
Ilustración 115: Circuito para almacenamiento de mediciones en memoria SD .....	155
Ilustración 116: Llenado del depósito .....	167
Ilustración 117: Proceso de llenado de contenedores.....	168

Ilustración 118: Operación y toma de muestras .....	169
Ilustración 119: DOP proceso de vaciado de los contenedores .....	172
Ilustración 120: Calendario de mediciones septiembre 2011 .....	177
Ilustración 121: Calendario de mediciones octubre 2011 .....	178
Ilustración 122: Página en Facebook del Mega Proyecto.....	189
Ilustración 123: Vista frontal del Biodigestor .....	199
Ilustración 124: Generador de 30kW .....	211
Ilustración 125: Estufa utilizada por el personal del área de parqueo de buses .....	229
Ilustración 126: Estufa a base de biogás .....	231
Ilustración 127: Diagrama de bloques del proceso .....	236
Ilustración 128: Presión (KPa) en cada día de medición para cada Biodigestor .....	238
Ilustración 129: Temperatura (°C) durante cada día de medición para cada Biodigestor .....	240
Ilustración 130: Iones característicos de CO <sub>2</sub> en la muestra de biogás .....	254
Ilustración 131: Búsqueda de Iones característicos de CH <sub>4</sub> en la muestra de biogás .....	255
Ilustración 132: Búsqueda de Iones característicos de H <sub>2</sub> S en la muestra de biogás.....	256
Ilustración 133: Cromatograma de la muestra de biogás del Biodigestor #1 con TCD.....	257
Ilustración 134: Cromatograma de la muestra de biogás del Biodigestor #1 con FID .....	258
Ilustración 135: Cromatograma de la muestra de biogás del Biodigestor #2 con TCD.....	259
Ilustración 136: Cromatograma de la muestra de biogás del Biodigestor #2 FID .....	260
Ilustración 137: Cromatograma de la muestra de biogás del Biodigestor #3 TCD.....	261
Ilustración 138: Cromatograma de la muestra de biogás del Biodigestor #3 FID .....	262
Ilustración 139: Pico observado por el análisis de estándar de CO <sub>2</sub> con el detector TCD ...	263

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Consumo energético en kWh 2010, por contador .....	6
Gráfica 2: Consumo energético en kWh 2011 .....	7
Gráfica 3: Variación de radio con respecto a la altura de recipiente de 20 galones.....	120
Gráfica 4: Linealización de Rx ( $\Omega$ ) vs Vs (V) .....	144
Gráfica 5: Error entre Rx teórica vs Rx experimental .....	145
Gráfica 6: Relación Rx vs temperatura .....	145
Gráfica 7: Relación presión vs voltaje .....	147
Gráfica 8: Linealización voltaje vs presión.....	148
Gráfica 9 - Salida del controlador de temperatura .....	151
Gráfica 10: Volumen de biogás producido diariamente .....	192
Gráfica 11: pH cada tercer día .....	195
Gráfica 12: Disminución de la demanda bioquímica de oxígeno en cada Biodigestor.....	196
Gráfica 13: DBO cada tercer día en cada Biodigestor .....	196

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación general de la producción de metano (31) .....	12
Ecuación 2. Cálculo de esfuerzo .....	19
Ecuación 3. Cálculo de esfuerzo de tensión .....	19
Ecuación 4. Cálculo de esfuerzo cortante .....	20
Ecuación 5. Cálculo de esfuerzo de compresión y tensión causado por flexión.....	21
Ecuación 6. Esfuerzo cortante horizontal causado por flexión.....	21
Ecuación 7. Cálculo de la carga crítica .....	22
Ecuación 8. Esfuerzo tangencial .....	23
Ecuación 9. Esfuerzo radial .....	24
Ecuación 10. Esfuerzo tangencial .....	24
Ecuación 11. Esfuerzo radial .....	24
Ecuación 12. Esfuerzo longitudinal .....	24
Ecuación 13. Esfuerzo tangencial mínimo.....	25
Ecuación 14. Esfuerzo longitudinal .....	25
Ecuación 15. Esfuerzo tangencial sobre un cono .....	25
Ecuación 16. Esfuerzo longitudinal en un cono .....	25
Ecuación 17. Ecuación de Bernoulli .....	26
Ecuación 18. Pérdidas por fricción .....	26
Ecuación 19. Pérdidas por accesorios .....	27
Ecuación 20. Variación de resistencia en RTD.....	37
Ecuación 21. Cálculo de energía.....	41
Ecuación 22. Degradación de materia orgánica .....	49
Ecuación 23. Cálculo de DBO.....	49
Ecuación 24: Esfuerzos internos en cilindros presurizados.....	71
Ecuación 25: Esfuerzos internos en conos presurizados. ....	71
Ecuación 26: $V_s$ vs $R_x$ .....	144
Ecuación 27: Conversión ADC vs $V_s$ .....	144

Ecuación 28: Vs vs Conversión ADC.....	144
Ecuación 29: Rx experimental vs Vs .....	145
Ecuación 30: Relación conversión ADC de presión vs voltaje .....	147
Ecuación 31: Relación voltaje vs conversión ADC .....	147
Ecuación 32: Relación voltaje vs presión .....	147
Ecuación 33: Cantidad de energía necesaria para aumento de temperatura .....	148
Ecuación 34: Energía necesaria para aumentar temperatura del agua .....	148
Ecuación 35: Energía necesaria para aumentar temperatura de acero .....	149
Ecuación 36: Energía necesaria para aumentar temperatura del aire .....	149
Ecuación 37: Energía requerida vs temperatura final.....	149
Ecuación 38: Horas necesarias para aumento de temperatura.....	150
Ecuación 39. Cálculo de masa de azúcar en el Biodigestor #1 .....	246
Ecuación 40. Cálculo de la masa de sólidos .....	246
Ecuación 41. Cálculo de la masa de líquido .....	246
Ecuación 42. Cálculo de la masa de biogás generado .....	247
Ecuación 43. Cálculo de la masa del efluente.....	247
Ecuación 44. Cálculo de la masa de metano y dióxido de carbono en el biogás .....	248
Ecuación 45. Cálculo de DBO.....	249
Ecuación 46. Cálculo de sólidos totales.....	249

## RESUMEN

Este trabajo de investigación tiene como objetivo principal evaluar la generación de biogás a partir de aguas residuales, por medio de un sistema de prototipos de Biodigestor en paralelo que permita comparar la producción al alterar la muestra o cambiar las condiciones del medio en que se encuentra el sustrato.

Con este fin, se construyó un sistema que cumpliera con los requerimientos necesarios de un Biodigestor. Es decir, cuenta con una cámara de carga, un sistema de transporte de sustrato que mueva la materia desde la cámara de carga hacia los tres tipos de Biodigestores y una cámara de almacenamiento de biogás. El sistema cuenta con un prototipo al cual se le agregó azúcar para alterar la muestra, alimentando las bacterias (Prototipo No. 1), otro de control que se mantiene como referencia con las condiciones sin modificar, o sea en condiciones naturales (Prototipo No. 2) y un tercer prototipo al cual se le agregó calor por medio de una resistencia eléctrica y aislamiento, lo cual hace que trabajen otro tipo de bacterias que degradan la materia más rápido (Prototipo No. 3).

Se utilizaron en la construcción del sistema materiales y componentes comúnmente utilizados en el medio. Para la cámara de carga se usó una fosa séptica, tubería PVC para el transporte del sustrato, toneles o depósitos de 55 galones para las cámaras de digestión y un gasómetro fabricado a base de contenedores plásticos de diferentes volúmenes.

El prototipo fue diseñado y fabricado de manera que se pudiera controlar el llenado de los Biodigestores, y que permitiera tomar muestras de la materia contenida en los mismos. Esto se hace por medio de válvulas. Así mismo, el gasómetro permite medir la cantidad de volumen de biogás generado. Para la toma de datos se cuenta con un sistema electrónico de medición. Adicionalmente, el prototipo No. 3, al cual se le añade calor, cuenta con un control de temperatura electrónico.

Se realizó un análisis químico de las muestras de sustrato que fueron obtenidas, las pruebas consistieron básicamente en: análisis de pH, sólidos totales, cromatografía de gases y DBO. . El análisis de cromatografía de gases tenía como objetivo identificar la cantidad de metano. A partir de estos análisis, se lograron obtener conclusiones concretas sobre el comportamiento de los prototipos. Los resultados mostraron que el prototipo No. 3, modificado con calor, generó más biogás en un lapso más corto de tiempo. Mientras que el prototipo No. 1, a pesar de que generó menor cantidad de biogás en un lapso corto de tiempo, en comparación con el prototipo No. 3, registró una producción más constante a lo largo del tiempo de retención.

En forma paralela, se hizo un análisis de seguridad industrial, calidad y estandarización del proceso. Así mismo, se llevó a cabo un análisis financiero para estimar el potencial de generación, mediante el aprovechamiento de las aguas residuales generadas en la Universidad. Para lo cual se evaluaron los resultados del 1 biogás generado por los prototipos y se le asignó la aplicación para la generación de energía eléctrica para establecer la factibilidad financiera del proyecto. Se estableció, que los prototipos como tales no resultan rentables, sin embargo, en ciertos escenarios y haciendo los cambios en el diseño para la construcción de un Biodigestor con capacidad real para el aprovechamiento de las aguas residuales de la Universidad podría llegar a ser económicamente factible.

# I. INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo de este estudio se contó con la participación conjunta de distintas especialidades, cuyos aportes se encuentran contenidos en seis módulos que serán explicados a lo largo del documento.

El Módulo de Diseño y Desarrollo del Prototipo, explica el funcionamiento de los componentes y el diseño de sus partes para que puedan cumplir con los requerimientos. Utilizando la mecánica de fluidos y resistencia de materiales, se realizó un análisis de cada uno de sus componentes. Así mismo, se presenta la configuración con la que deben ser ensamblados los componentes. Se muestra el resultado del esfuerzo que necesitan soportar los materiales en base a la presión y condiciones que soportarán, con el fin de orientar las decisiones sobre los materiales a utilizar en la fabricación, este módulo fue realizado por Juan Manuel Morales Muralles a quien agradecemos su aporte para la realización de este proyecto.

El Módulo de Fabricación, Instalación y Mantenimiento determina los materiales y la logística de adquisición. Presenta una serie de toma de decisiones para establecer qué tipos de materiales y componentes del medio se utilizarán, la manera en que se harán los ensamblajes y sellos del prototipo y demás funciones enfocadas hacia la fabricación e instalación del prototipo. Básicamente consiste en llevar el diseño a la realidad, por medio de la implementación de un proyecto, tomando decisiones con base en conceptos y fundamentos de ingeniería. Además, en este módulo se establecen las medidas para asegurar el correcto funcionamiento del prototipo y se determinan los requerimientos de mantenimiento preventivo, correctivo y de avería en el caso que sea necesario.

El Módulo de Automatización tiene por objetivo proporcionar una medición automática de la presión y temperatura de los prototipos por medio de sensores y circuitos electrónicos, a manera de exportar los datos hacia la computadora por medio de dispositivos comunes. También, en este módulo se incluye la implementación del sistema eléctrico y electrónico, que son necesarios para el control de la temperatura del prototipo No. 3, cuyas condiciones son modificadas aplicando calor.

En el Módulo de Seguridad Industrial se determinan los riesgos presentes en el sistema de prototipos, el método de prevención de los mismos, así como, los requerimientos de vestimenta de los operarios y las señalizaciones requeridas en el área. También, identifica las variables para medir la calidad y las herramientas aplicables. En este módulo se incluye, a la vez, la estandarización del proceso tanto de llenado inicial, toma de muestras como de vaciado del sistema de prototipos.

En el Módulo de Análisis Químicos se muestran los resultados de las mediciones de sólidos totales, pH y demanda bioquímica de oxígeno (DBO). El módulo presenta, a la vez, los resultados de la generación de biogás y las conclusiones sobre el desempeño de cada uno de los tres prototipos, basándose en la producción de biogás y sus características respecto a la degradación de la materia orgánica. Se incluyen los resultados del análisis de cromatografía de gases, para determinar la composición de metano en el biogás.

El Módulo de Factibilidad Financiera, presenta una estimación del potencial de generación de energía eléctrica, mediante el aprovechamiento de las aguas residuales generadas en la Universidad, con base a los resultados de generación del sistema de prototipos. Se determinaron varios escenarios, bajo los cuales podría operar un Biodigestor en condiciones reales de acuerdo a la capacidad requerida. Además, se establecieron los cambios que deben implementarse para que el proyecto sea financieramente viable.

## II. ANTECEDENTES

Las instalaciones de la Universidad Del Valle de Guatemala cuentan con un anexo, siendo éste el área del Taller de Metal/Mecánica, sujetas al presente estudio.

### A. Taller de Metal-Mecánica de la Universidad del Valle de Guatemala:

1. **Instalaciones.** Las instalaciones del Taller de Metal-Mecánica de la Universidad del Valle de Guatemala sujetas al presente estudio se encuentran ubicadas en la 11 calle 15-79 Zona 15 Vista Hermosa III.

2. **Distribución de las instalaciones.** En el área del Taller de Metal-Mecánica de la Universidad, se encuentra un taller de buses del Colegio Americano de Guatemala, en donde se les da mantenimiento, abastecimiento de combustible y donde se parquean por las noches y cuando no se encuentran operando.

Dentro del área del Taller de Metal-Mecánica se encuentra también el Taller de Carpintería de la Universidad del Valle de Guatemala. Ver Ilustración 1.

**Ilustración 1: Imagen aérea del parqueo de buses del Colegio Americano de Guatemala, y las instalaciones de la UVG que se encuentran en el área (Círculos amarillos)**



Fuente: <http://maps.google.com.gt/maps?hl=es&tab=wl>

3. **Población.** El área de parqueo de buses está designada, además, para la estadía de los conductores de buses mientras los estudiantes del Colegio Americano asisten a clases entre

semana. Dentro de las actividades ordinarias de los conductores se encuentran actividades de mantenimiento y limpieza de los autobuses, por lo que pasan la mayor parte de su jornada laboral en esta área. Se pudo establecer que se encuentran aproximadamente 26 personas en esta área por aproximadamente 6 horas diarias, en las cuales hacen uso del sanitario que tienen asignado, el cual se encuentra conectado a una única fosa séptica de aproximadamente 3 m<sup>3</sup>. El área donde se ubicó el Biodigestor se encuentra a una distancia prudencial de las instalaciones que ocupa el personal.

4. **Beneficios del sector.** El área del Taller de Metal-Mecánica de la Universidad cuenta con amplio espacio al aire libre y tiene una fuente abundante de aguas residuales, proveniente de la fosa séptica a donde llegan a depositarse los lodos provenientes de los sanitarios del área.

Es por ello que se estableció que esta área facilitaba todos los requerimientos necesarios para la operación de un Biodigestor, por lo que se decidió seleccionar el área para montar el proyecto.

Debido a que en el Biodigestor se estarán manipulando desechos potencialmente riesgosos para la salud de las personas, y debido a que podría haber emanación de malos olores, se buscaba un lugar poco transitado y al aire libre, por lo que también se cumplió con este requerimiento.

## B. Universidad del Valle de Guatemala:

1. **Instalaciones.** La Universidad del Valle de Guatemala se encuentra situada en la 18 avenida 11-95 zona 15 Vista Hermosa III de la ciudad de Guatemala. Las instalaciones de la Universidad abarcan un área aproximada de 64,375 metros cuadrados.

2. **Distribución de las instalaciones.** Las instalaciones de la Universidad se encuentran distribuidas dentro del terreno delimitado en la Ilustración 2, donde se puede observar que aproximadamente 1/3 del terreno se encuentra asignado a áreas verdes y las áreas restantes corresponden a edificios para aulas, áreas administrativas, laboratorios y parques.

**Ilustración 2: Distribución de las instalaciones de la Universidad**



Fuente: <http://maps.google.com.gt/maps?hl=es&tab=wl>

**3. Población.** De acuerdo al dato proporcionado por el departamento de finanzas de la Universidad, la población que asiste a la Universidad se puede dividir en dos categorías: Personas contratadas por la Universidad y los estudiantes. Estando integrados de la siguiente forma:

- Personal contratado por la Universidad: 400 personas, 8 horas al día.
- Estudiantes jornada matutina: 800 personas.
- Estudiantes jornada vespertina y nocturna: 800 personas

Con base a los datos anteriores se puede establecer que asisten diariamente a la Universidad un equivalente de 2,000 personas. Si se desea obtener la equivalencia del total de personas que pasan 8 horas diarias en la Universidad se puede establecer que los 1,600 estudiantes que asisten en ambas jornadas, representan o conforman un equivalente a 800 estudiantes que asisten en jornada completa diariamente.

Adicionando los 400 trabajadores que asisten 8 horas junto con el equivalente de los 800 alumnos que asisten 8 horas nos da un total de 1,200 personas que asisten diariamente en jornada completa.

Este valor será de gran utilidad para hacer el cálculo de la estimación teórica del volumen de la fosa séptica que cubra los requerimientos de la Universidad.

**4. Consumo eléctrico de la Universidad.** Dentro de los principales costos de operación que registra la Universidad se encuentra el correspondiente al consumo eléctrico, derivado de sus amplias instalaciones y de la demanda energética requerida para sus operaciones diarias. Los principales focos de consumo energético se derivan de: necesidades de iluminación, proyectores digitales, equipo de computación, y equipo de los laboratorios.

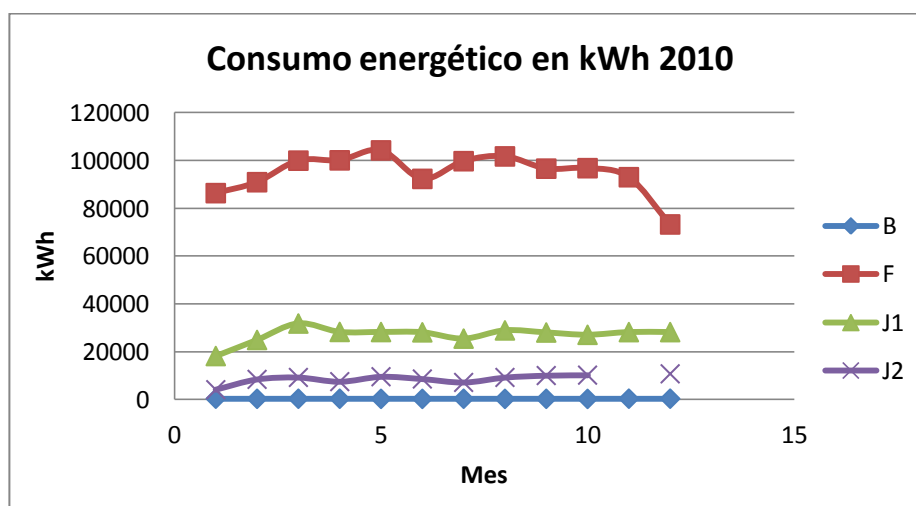
El departamento de finanzas de la Universidad proporcionó una tabla histórica del consumo energético en el campus central del 2010 y datos al mes de agosto de 2011. A continuación se muestran los consumos en kWh:

**Tabla 1: Consumo eléctrico en kWh para el año 2010**

Contador	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
B	397	348	375	373	331	322	368	314	353	311	392	397
F	86,358	90,931	99,951	100,085	104,226	92,315	99,725	101,721	96,597	96,807	93,018	73,265
J1	18,240	24,960	31,840	28,320	28,280	28,160	25,520	28,960	28,080	27,120	28,240	28,240
J2	4,160	8,480	9,280	7,520	9,600	8,640	7,200	9,280	10,080	10,240	-	10,800
<b>Total</b>	<b>109,155</b>	<b>124,719</b>	<b>141,446</b>	<b>136,298</b>	<b>142,437</b>	<b>129,437</b>	<b>132,813</b>	<b>140,275</b>	<b>135,110</b>	<b>134,478</b>	<b>121,650</b>	<b>112,702</b>

En la siguiente gráfica se puede observar la tendencia de consumo mensual correspondiente a los cuatro contadores analizados para el año 2010:

**Gráfica 1: Consumo energético en kWh 2010, por contador**



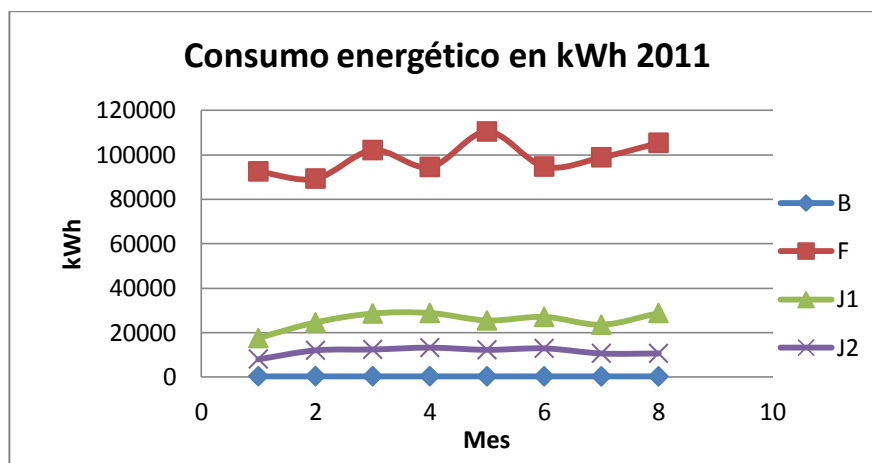
Las cifras de consumo energético, registrado a agosto de 2011 se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2: Consumo eléctrico en kWh para el año 2011

Contador	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.
B	327	364	348	348	308	291	281	261
F	92,546	89,313	102,139	94,542	110,504	94,727	98,896	105,418
J1	17,520	24,560	28,560	28,800	25,440	27,040	23,520	28,800
J2	8,080	12,000	12,400	13,200	12,240	12,880	10,640	10,640
<b>Total</b>	<b>118,473</b>	<b>126,237</b>	<b>143,447</b>	<b>136,890</b>	<b>148,492</b>	<b>134,938</b>	<b>133,337</b>	<b>145,119</b>

En la siguiente gráfica se puede observar el consumo eléctrico para el 2011.

Gráfica 2: Consumo energético en kWh 2011



De acuerdo a información proporcionada por el departamento de Finanzas de la Universidad del Valle de Guatemala, el costo promedio en kWh del consumo eléctrico es de 1.557169Q/kWh. Este dato será utilizado a lo largo de este trabajo para determinar el valor monetario de 1 kWh.

**5. Inversiones de la Universidad.** Se utilizará como referencia el valor de 8% de interés anual, que es la tasa preferencial que se maneja en el mercado para las cuentas de ahorro. Este valor se utilizará como referencia para cálculos posteriores.

**6. Apoyo de instituciones.** De acuerdo a lo informado por el Ing. Rolz, encargado del Centro de Ingeniería Bioquímica del Instituto de Investigación de la Universidad del Valle de Guatemala, son muchas las instituciones medioambientales que se encuentran interesadas en

financiar proyectos ecológicos para la generación de energía de fuentes naturales. Dichas instituciones reciben y evalúan proyectos que de ser autosostenibles y que busquen promover el cuidado del medio ambiente, tienen muchas probabilidades de recibir el apoyo financiero para su implementación.

Se espera que este proyecto reúna los requisitos necesarios para recibir el apoyo financiero de alguna institución dedicada a la protección del medio ambiente.

### III. MARCO TEÓRICO

#### A. Digestión anaeróbica

La digestión anaerobia es un proceso natural que ocurre como resultado del trabajo metabólico de bacterias y otros microorganismos. Este proceso conlleva la descomposición de la materia orgánica y la subsecuente formación de gas metano. Los organismos anaeróbicos han sido esenciales a la digestión de restos alimenticios vegetales en los tractos alimenticios de herbívoros durante la historia de la evolución. (57)

El metabolismo anaeróbico microbiano ocurre cuando el ingreso de oxígeno se detiene completamente o se limita al punto que otros microorganismos remueven el oxígeno. Esto provoca que las condiciones ambientales sean adecuadas para que ocurra el crecimiento de bacterias metanogénicas y se produzca metano. (57)

La descomposición de la materia orgánica también puede ocurrir en presencia de oxígeno, lo que ocurre más comúnmente. A continuación se presenta la Tabla comparativa de las dos formas de descomposición.

**Tabla 3: Comparación entre metabolismo aeróbico y anaeróbico**

Características	Metabolismo aeróbico	Metabolismo anaeróbico
<b>Reacción química</b>	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CO_2 + 3CH_4$
<b>Generación de calor</b>	2,840 kJ/mol de glucosa	393 kJ/kmol de glucosa
<b>Destino del carbono</b>	50% se convierte en $CO_2$ y 40%-50% se incorpora a biomasa microbiana.	95% se convierte en $CH_4$ y $CO_2$ y 5% se incorpora a biomasa microbiana.
<b>Destino de la energía</b>	60% se almacena en nueva biomasa y 40% se pierde como calor.	90% retenida en $CH_4$ , 3%-5% perdida en calor y 5%-7% almacenada en biomasa.
<b>Consumo de energía</b>	Alto	Nulo
<b>Adición de nutrientes</b>	Alta, especialmente Nitrógeno	Mínima a nula
<b>Tiempo de arranque</b>	Corto	Largo
<b>Avance de la tecnología</b>	Tecnología establecida	Reciente, en investigación
<b>Tolerancia a la temperatura</b>	Amplio rango	Mayores de 15°C

(72)

En condiciones anaerobias ocurre una reacción fermentativa, que puede ocurrir en un esquema de dos etapas o de tres etapas; lo que depende de los grupos metabólicos de bacterias presentes en el sistema. En años recientes se ha aceptado más el esquema fermentativo en tres etapas. En este esquema, el primer grupo de bacterias, las bacterias fermentativas, son responsables de la degradación primaria de los sustratos mayores, como polisacáridos, proteínas y lípidos, con la producción de ácidos grasos volátiles, alcoholes, dióxido de carbono, hidrógeno, amoníaco y sulfuros. El segundo grupo de bacterias degradan propionatos y otras cadenas largas de ácidos grasos para producir acetato, dióxido de carbono e hidrógeno. El último grupo, el de las bacterias metanogénicas, se encarga de utilizar el hidrógeno para reducir el dióxido de carbono en metano, así como la conversión de los acetatos en metano y dióxido de carbono. Existe un cuarto grupo de bacterias que llevan a cabo una hidrogenación acetogénica para la formación de acetato a partir de hidrógeno y monóxido de carbono. (32)

A continuación se describen las etapas de la digestión anaerobia:

**1. Etapa 1: Rompimiento de polímeros.** El sustrato inicial de esta etapa son los desperdicios compuestos principalmente por carbohidratos, algunos lípidos, proteínas y material inorgánico. Se requiere una amplia variedad de bacterias anaeróbicas para solubilizar estos materiales, incluyendo bacterias con capacidades enzimáticas celulolíticas, lipolíticas y proteolíticas. La siguiente tabla muestra los principales componentes de las aguas residuales:

**Tabla 4: Componentes de las aguas residuales**

Componente	Porcentaje (% en base de peso seco)
Hemicelulosa	6
Celulosa	34.5
Lípidos	14.0
Proteínas	19.0
Cenizas	34.0

(57)

Las bacterias celulolíticas son usualmente divididas en dos clases dependiendo de la temperatura a la que ocurre la digestión. Las bacterias mesofílicas tienen su desempeño óptimo a una temperatura entre 30°C y 40°C, mientras que las termofílicas lo tienen entre 50°C a 60°C. Ambas especies tienen un pH óptimo entre 6 y 7. Ya que durante el rompimiento de la celulosa se producen ácidos orgánicos, puede ser que el pH baje, durante la iniciación de la fermentación y durante el proceso digestivo, por lo que puede ser necesario agregar cal al sistema para mantener

controlado el pH. El pH del sistema entero alcanza el equilibrio cerca de 7 cuando las bacterias de la etapa 2 y 3 estén presentes en una reacción esté balanceada, ya que los ácidos orgánicos se van consumiendo mientras se producen. (57)

Éste es probablemente el paso limitante en la producción de metano, ya que la acción bacterial es menor que en las otras dos etapas. (57)

**2. Etapa 2: Producción de ácidos.** Los monómeros que se obtienen de la etapa 1 son el sustrato de las bacterias productoras de ácidos de la etapa 2. Los ácidos son el producto del metabolismo bacteriano, ácido acético, propiónico y láctico son los principales productos. (57)

En esta etapa trabajan gran variedad de bacterias y la proporción de ácidos, gas hidrógeno, dióxido de carbono y alcoholes simples producidos dependen de la flora presente así como de las condiciones ambientales. (57)

A pesar de que se producen varios ácidos, las bacterias metanogénicas se restringen al uso de ácido acético como sustrato. Otras bacterias metanogénicas pueden producir metano de gas hidrógeno y dióxido de carbono. Sin embargo, se sabe que aproximadamente el 70% del metano producido es proveniente de ácido acético. (57)

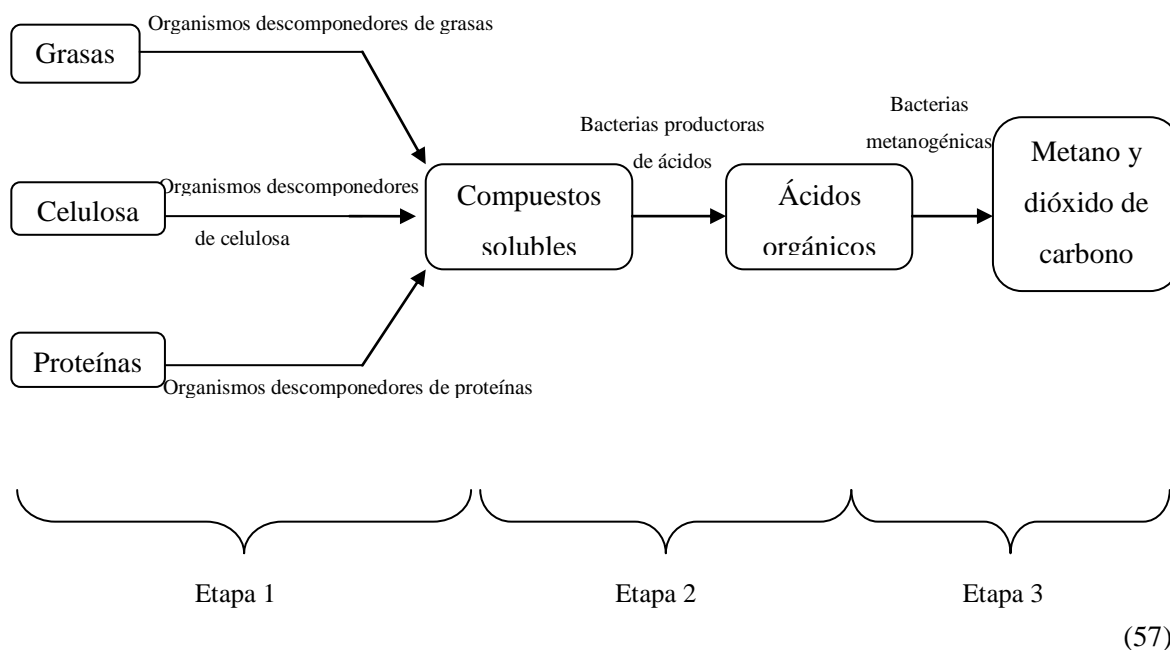
**3. Etapa 3: Producción de metano.** Las bacterias metanogénicas utilizan principalmente, ácido acético para producir metano. Estas bacterias también dependen de las bacterias de las etapas 1 y 2 que les proveen nutrientes: por ejemplo, los compuestos de nitrógeno orgánico deben ser reducidos a amonio para asegurarse la utilización eficiente de nitrógeno por las bacterias metanogénicas. (57)

Las bacterias metanogénicas utilizan principalmente, ácido acético para producir metano. Estas bacterias también dependen de las bacterias de las etapas 1 y 2 que les proveen nutrientes: por ejemplo, los compuestos de nitrógeno orgánico deben ser reducidos a amonio para asegurarse la utilización eficiente de nitrógeno por las bacterias metanogénicas. (57)

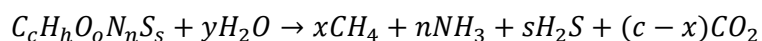
Además, las bacterias metanogénicas son bastante sensibles a algunos factores ambientales. Ya que son bacterias anaeróbicas, su crecimiento se inhibe por pequeñas cantidades de oxígeno. Cualquier otro oxidante fuerte, como los nitritos y nitratos, también pueden inhibir su crecimiento. También son bastante sensibles a cambios en el pH, su pH óptimo es entre 7.0 y 7.2, sin embargo la producción es satisfactoria entre 6.6 y 7.6. Si el pH cae debajo de 6.6 habrá una inhibición significativa de las bacterias metanogénicas. (57)

Se presenta una gráfica que resume las etapas mencionadas:

**Ilustración 3: Etapas de la digestión anaerobia**



La producción de metano a partir de biomasa sigue la siguiente ecuación general:



$$x = \frac{1}{8} * (4c + h - 20 - 3n - 2s)$$

$$y = \frac{1}{4} * (4c - h - 20 + 3n + 3s)$$

**Ecuación 1. Ecuación general de la producción de metano (31)**

Dependiendo de las relaciones estequiométricas y de la composición del sustrato (ya sean proteínas, grasas o carbohidratos) se pueden obtener diferentes productos. (32)

Ya que el azufre permanece en el residuo y parte del dióxido de carbono se une al amoníaco, el resultado general es una composición de biogás de  $CH_4 : CO_2 = 71\% : 29\%$ . Esta proporción está determinada por la porción de reducción de la materia orgánica. (32)

Durante siglos el ser humano ha reconocido el potencial de utilizar el proceso de fermentación anaeróbica para producir metano y utilizarlo como combustible. En algunos países subdesarrollados, el excremento de animales y humanos se deposita en tanques con desechos

vegetales para descomponerse. El metano que se produce se usa, luego, como combustible. Países industrializados han perfeccionado el proceso de digestión anaeróbica en gran escala como un método para el tratamiento de desechos municipales e industriales. Debido a la escasez de combustibles fósiles, el proceso de producción de metano por medio de la fermentación anaerobia ha cobrado importancia. Actualmente, al darse cuenta que las fuentes de combustibles fósiles son limitadas, ha aumentado el interés en la producción de gas metano como una fuente de energía renovable. (57)

Para llevar a cabo de manera adecuada el proceso de producción de biogás por digestión anaerobia es necesario tener en cuenta el control de diversos factores, entre los que se encuentran:

**Tabla 5: Parámetros a controlar durante la digestión anaerobia**

Parámetro	Valor recomendado
<b>Temperatura</b>	Alrededor de los 35°C
<b>Acidez</b>	6.6 - 7.6
<b>Contenido de sólidos</b>	10%
<b>Nutrientes</b>	Carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales.
<b>Tóxicos</b>	No agregar oxígeno, concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales, residuos detergentes, pesticidas o antibióticos.

(32)

Como se mencionó anteriormente, existen bacterias termofílicas que pueden generar metano a altas temperaturas (hasta 60°C), pero éstas existen en menor cantidad que las mesofílicas, por lo que la temperatura óptima es de 35°C. Debajo de estas temperaturas, la acción de las bacterias disminuye y a temperaturas más altas, pueden llegar a desactivarse. Respecto al pH, éste baja durante la acción fermentativa y aumenta durante la acción metanogénica, por lo que si ambas etapas ocurren a la misma velocidad el pH se mantendrá estable. (32)

La luz no es letal para las bacterias metanogénicas, pero inhibe la metanogénesis; por lo que ésta debe llevarse a cabo en absoluta oscuridad. La remoción de biogás producido tiene una influencia considerable en las reacciones biológicas. La concentración de microorganismos puede ser aumentada por un factor de 12 en el caso de metanogénesis extremadamente termofílica cuando los gases producidos se remueven en gran cantidad. (32)

## B. Biodigestores

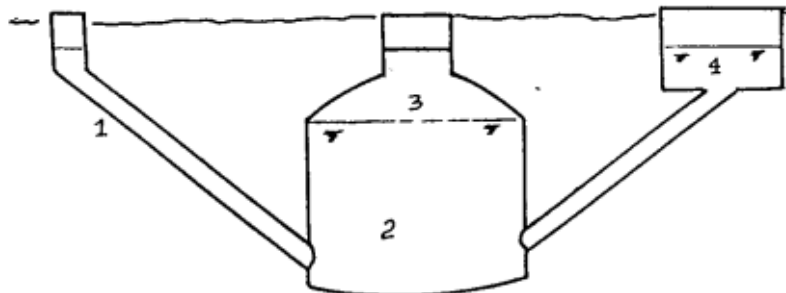
Un Biodigestor es un tanque aislado, que no permite la entrada de aire para tener un medio anaerobio dentro de él. En los Biodigestores ocurre la degradación de la materia orgánica. Existen varios modelos de Biodigestor, estos cambian según su biomasa y las condiciones en que serán utilizados. La mayoría de Biodigestores cuenta con las siguientes partes: (44)

- Cámara de carga: el sustrato generalmente se almacena en una cámara de carga antes de su ingreso. Dependiendo del digestor esta cámara deberá ser capaz de almacenar un volumen equivalente a dos días de carga. Debe tener un sistema de alimentación de agua para realizar las diluciones del material y algún mecanismo o instrumento de agitación para homogenizar la carga. (44)
- Sistema de transporte de sustrato (1): la selección y/o diseño del equipo de transporte se fundamentan en los siguientes parámetros: viscosidad, tipo, tamaño y proporción de sólidos, contenido de sólidos totales, proporción de agua pura, caudales requeridos. Básicamente son tubos, bombas, etc. Para grandes concentraciones sólidas son necesarias bombas de desplazamiento positivo. Se puede usar también simplemente gravedad y que el sustrato fluya. La entrada y salida debe estar fuera del borde de la fosa o cuenca. Así ningún sustrato puede fluir fuera de la fosa y no se requieren de válvulas de compuerta. (44)
- Cámara de digestión (2): la cámara de digestión deberá cumplir los siguientes requisitos:
  - Impermeable al agua y al gas para evitar las pérdidas del líquido en digestión, con el consecuente peligro de contaminación; y la pérdida de gas que disminuirá la eficiencia y provocaría el riesgo de explosiones en las cercanías del digestor. (44)
  - Aislante, las pérdidas de calor deben ser evitadas al máximo, puesto que el mantenimiento de la temperatura de digestión es logrado con el aporte de calor externo y por lo tanto todo ahorro en este sentido redundará en una mayor cantidad de energía neta disponible. Este aspecto es particularmente importante para los digestores que trabajan a temperaturas meso y termofílicas. (44)

- Mínima relación superficie/volumen, a fin de ahorrar material y mano de obra, así como también reducir la superficie de intercambio de calor. (44)
- Estabilidad estructural, capaz de soportar cargas estáticas y dinámicas; incluyendo un cuidadoso estudio del suelo, especialmente en los que serán construidos bajo tierra, donde se pueda afectar alguna capa freática. La cámara de digestión puede tener un mecanismo de agitación. Básicamente existen tres tipos: mecánicos (palas, hélices, tornillos sinfín), bombas de recirculación, inyectores de gas y circulación natural por desplazamiento de líquido interno. Es conveniente el precalentamiento de la carga y la optimización del aislamiento a fin de reducir al mínimo el requerimiento de calor para mantener la temperatura estable. (44)
- Cámara de almacenamiento de efluente (4): el dimensionamiento y diseño dependerá del uso que se le dará al efluente. Como mínimo deberá tener un volumen 1.5 a 2 veces superior al de descarga. (44)
- Cámara de almacenamiento de biogás (gasómetro) (3): es un dispositivo para almacenar el gas a baja presión, ya que es más simple hacerlo así. Se pueden usar también digestores totalmente cerrados que almacenan el gas a presión constante o variable. También una campana gasométrica que puede flotar sobre el líquido en fermentación o estar separado del digestor, flotando sobre agua formando un sello hidráulico. El tercer tipo posee una cúpula fija y una cámara de hidropresión que permite el desplazamiento del sustrato en fermentación a medida que se acumula el gas. Por último el tipo gasómetro plástico inflable. Este contenedor plástico puede cubrir el digestor en su parte superior como una campana o estar separado, almacenando a presión constante y volumen variable. En este tipo también se puede variar la presión de la misma forma que en el de campana gasométrica. (44)

A continuación se presenta un esquema general:

Ilustración 4: Esquema general de un Biodigestor



(41)

Dentro de los principales usos que se le da a los Biodigestores se encuentran la captación de biogás, el cual puede ser asignado a alguna aplicación provechosa, pues su potencial energético es elevado, y considerando que se obtuvo de desechos, todo lo que aporten representa ser beneficioso. (3, 26, 43)

Otro uso que se le da a los Biodigestores es para la producción de abono orgánico. Debido al elevado contenido químico de los desechos orgánicos, se logra descomponerlos de tal manera en la que se eliminan las bacterias y virus para luego poder obtener provecho del abono generado. (3)

Los Biodigestores pueden clasificarse según diferentes características, dentro de las que destacan:

### 1. Según su forma de alimentación:

- Fermentación continua: En este caso la fermentación en el digestor es un proceso ininterrumpido, el afluente que descarga es igual al material que entra, por lo tanto la producción de gas es uniforme en el tiempo.
- Fermentación semicontinua: Se introduce al inicio una carga de gran cantidad de materiales, cuando va disminuyendo el rendimiento del gas se agrega más materia prima y se descarga un efluente de la misma cantidad.
- Fermentación por lotes: El digestor se carga una sola vez, cuando el rendimiento de gas decae, después de un período de fermentación, se vacía el Biodigestor y se alimenta de nuevo. (41)

- El Biodigestor tipo batch consiste en un contenedor que almacena herméticamente los desechos orgánicos, manteniendo ciertas condiciones ambientales que facilitan y permiten la descomposición de la materia, dando como producto biogás. (10, 43)
- Luego de que la materia orgánica se descompone, el biogás generado puede ser asignado a alguna aplicación en la que se busque aprovechar su potencial energético. (10,43)
- Este tipo de Biodigestor resulta ser muy fácil de construir y permite la toma de mediciones y el control de los resultados de forma simple y requiere poca supervisión. La desventaja que posee es que su tasa de generación es irregular (10)
- Para este estudio, el tipo de Biodigestor que se utilizará será el de tipo batch, pues se consideraron sus ventajas y facilidades de manejo, adicionalmente, como este tipo de Biodigestor mantiene un batch de aguas residuales durante todo el proceso de descomposición, se puede tener un mejor control del potencial total de generación de biogás. (10, 43)

## **2. Según la temperatura de operación:**

- Fermentación termofílicas: ocurre a una temperatura entre 41°C-55°C. A estas temperaturas la digestión es rápida, hay un alto rendimiento de gas y un corto tiempo de retención.
- Fermentación mesofílica: requiere una temperatura entre 28°C-35°C, la descomposición es más lenta que la anterior y con menos consumo de energía.
- Fermentación a temperatura ambiente: la producción del gas varía de la temperatura ambiente. Requiere una baja inversión. (41)

## **3. Según el número de etapas:**

- Fermentación en una sola etapa: la digestión ocurre en un solo depósito. Tiene una estructura simple, de fácil operación y bajo costo.
- Fermentación de dos o más etapas: La digestión ocurre en dos o más depósitos de fermentación. La carga se degrada primero en un depósito y su efluente pasa a la siguiente etapa, donde se sigue degradando. Estos digestores tienen un largo período de retención, buena descomposición de la materia orgánica y una alta inversión. (41)

La implementación de Biodigestores para utilizar como fuentes de energía alternativa, trae ventajas no solamente económicas sino también para el medio ambiente, se enumeran algunas de éstas a continuación:

#### **4. Ventajas medioambientales:**

- Generan biogás, lo que contribuye a la disminución de los gases de invernadero liberados a la atmósfera.
- Reducen la deforestación ya que el biogás generado se puede utilizar para cocinar o calentar hogares sustituyendo a la leña.
- Dan una alternativa para el manejo de desechos ya que en vez de desecharlos de manera inapropiada, se introducen al Biodigestor para producir biogás.
- El residuo de los desechos utilizados para la digestión anaeróbica se puede utilizar como abono, disminuyendo los químicos y fertilizantes usados en las cosechas. (36)

#### **5. Ventajas económicas:**

- Disminuyen los gastos en energía eléctrica ya que no necesitan electricidad para operar y generan biogás que puede sustituir el uso de ésta.
- Reducen el gasto en abonos y fertilizantes ya que se puede utilizar el restante de la digestión anaeróbica para abonar cultivos.
- Contribuyen a disminuir los costos de manejo de materiales de desechos orgánicos. (36)

Para proceder con el diseño del Biodigestor, es necesario repasar ciertos conceptos básicos que facilitarán la comprensión en el momento en que se trate el tema del diseño:

### **C. Resistencia de materiales**

La resistencia de materiales es la rama de la mecánica aplicada que estudia el comportamiento de los cuerpos sólidos sometidos a diversas cargas. El análisis teórico y los resultados experimentales cumplen funciones de igual importancia en la mecánica de materiales. Se usan teorías para deducir fórmulas y ecuaciones con el objeto de predecir el comportamiento mecánico, pero no se pueden usar esas ecuaciones en el diseño práctico, a menos que se conozcan las propiedades físicas de los materiales. (17)

Los materiales sufren de deformación al ser sujetos a esfuerzos. Existen dos tipos de deformaciones importantes a identificar para la acción de los esfuerzos, la deformación elástica y la deformación plástica.

- La elástica es aquella deformación temporal en la pieza, es decir que al momento de que se retiren sus esfuerzos regresará a su geometría original.
- La plástica es causada por esfuerzos de mayor magnitud y es una deformación permanente en la geometría de la pieza. (17)

**1. Esfuerzo.** El esfuerzo es una propiedad de estado en un punto específico dentro de un cuerpo, la cual es una función de la carga, la geometría y las propiedades físicas del material. El esfuerzo( $\sigma$ ) es la resultante de una carga( $P$ ) en relación al área( $A$ ) de aplicación. (17)

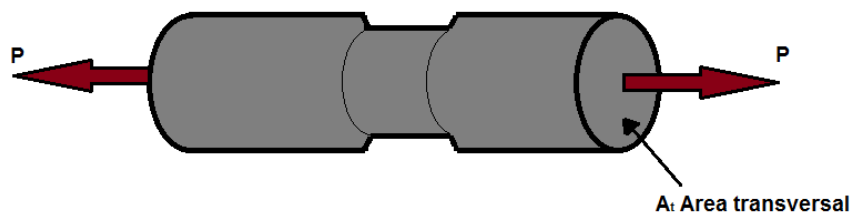
$$\sigma = \frac{P}{A}$$

#### Ecuación 2. Cálculo de esfuerzo

Existen varios tipos de esfuerzos, cada uno tiene su propia magnitud y dirección. Puesto que cada material tiene sus propias características para cada uno de ellos es importante identificarlos. (17)

**a. Tensión.** Es causado por cargas opuestas que intentan estirar la pieza.

Ilustración 5: Deformación por tensión



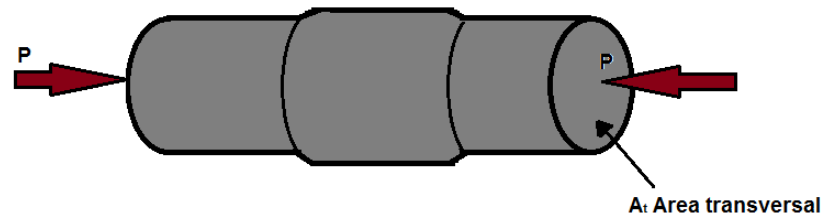
El cálculo del esfuerzo de tensión es igual a la carga en razón del área transversal de la pieza. (17)

$$\sigma_{tensión} = \frac{P}{A_t}$$

#### Ecuación 3. Cálculo de esfuerzo de tensión

**b. Compresión.** Es el esfuerzo causado por la acción de dos cargas opuestas que intentan comprimir una pieza.

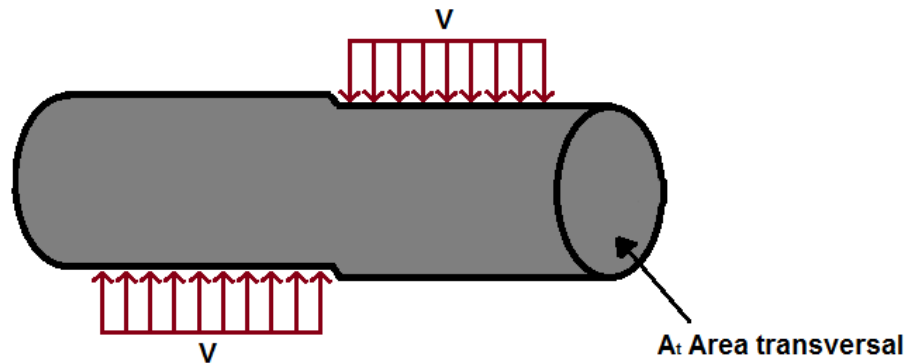
**Ilustración 6: Deformación por compresión**



El cálculo del esfuerzo compresión es muy similar al cálculo de tensión. En el caso de piezas en compresión hay que tomar en cuenta dos tipos de fenómenos, el esfuerzo de compresión y el pandeo. Éste puede llegar a ser crítico en casos en donde la pieza es muy delgada en relación a su área transversal. (17)

**c. Cortante.** Los esfuerzos cortantes son causados por cargas perpendiculares al área transversal y opuesta entre sí.

**Ilustración 7: Deformación por corte**



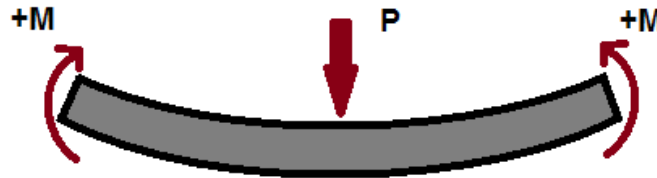
El cálculo del esfuerzo cortante se obtiene al dividir la fuerza cortante entre el área transversal. (17)

$$\tau = \frac{V}{A_t}$$

**Ecuación 4. Cálculo de esfuerzo cortante**

**d. Flexión.** El esfuerzo flexionante es causado por los momentos aplicados a una pieza. Hay que tener en cuenta que el momento flexionante en una pieza puede ser causado por un momento puntual, por cargas o la suma de estas. (17)

**Ilustración 8: Deformación por flexión**



La flexión causa varios esfuerzos internos, cuando ésta es positiva causa compresión en la parte superior, tensión en la parte inferior (éstas son iguales en el caso que el área transversal sea simétrica por la horizontal) y un esfuerzo cortante horizontal (máximo en la parte media). Si en la pieza se encuentra aplicada una o más cargas, también se encontrará un esfuerzo cortante vertical. (17)

Esfuerzo de compresión y tensión causado por flexión:

$$\sigma_x = \frac{My}{I}$$

**Ecuación 5. Cálculo de esfuerzo de compresión y tensión causado por flexión**

Esfuerzo cortante horizontal causado por flexión:

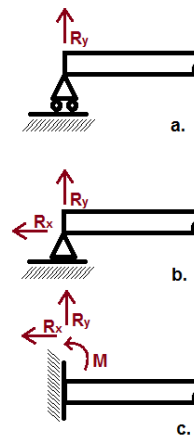
$$\tau_{max} = \frac{3V}{2A}$$

**Ecuación 6. Esfuerzo cortante horizontal causado por flexión**

**2. Vigas.** Las estructuras se clasifican según los tipos de cargas que soportan. En el caso que las cargas causen flexión se les considera una viga.

Las vigas se describen según el modo en que están sostenidas. Esto determinará las reacciones que tendrá sobre el resto de la estructura. Existen tres tipos de apoyos para las vigas. (17)

**Ilustración 9: Reacciones según soporte aplicado**



En la Ilustración 9 se puede ver las reacciones que cada tipo de soporte ejerce sobre la viga. Cabe mencionar que la viga empotrada (c.) es la más segura. (17)

Para que una viga se considere que está empotrada tiene que tener una sujeción sólida. En el caso de las estructuras que se utilizaron en la construcción del proyecto solamente se pueden considerar como las articulaciones del tipo (a.) (17)

**3. Columnas.** Una columna es una pieza sometida a una carga de compresión, la cual tiene largo considerablemente mayor a su área transversal. Para encontrar la carga crítica que una columna puede soportar se utilizan las ecuaciones de pandeo de Euler. La cual se calcula de la siguiente manera: (17)

$$P_{cr} = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2}$$

**Ecuación 7. Cálculo de la carga crítica**

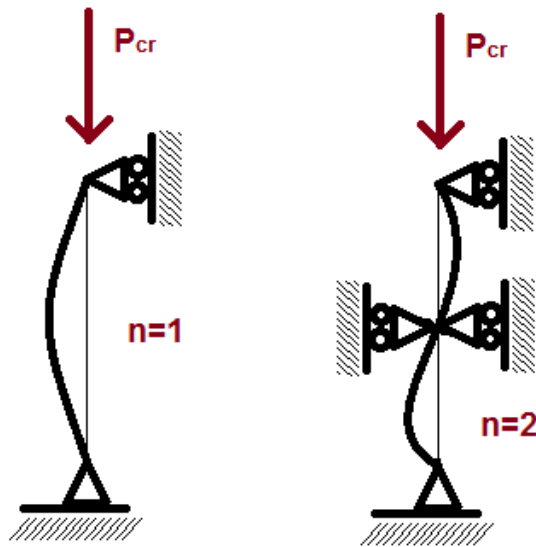
En donde:

- $P_{cr}$  = Carga crítica
- $n$  = Número de flexiones en la columna
- $E$  = Módulo de elasticidad
- $I$  = Momento de inercia
- $L$  = Largo de la columna

Las columnas al igual que las vigas se pueden clasificar por el tipo de soportes a los que está sujeta. (17)

Para la ecuación de Euler únicamente (n) cambiará para los diferentes arreglos de soportes. (17)

Ilustración 10: Columnas en pandeo



En este proyecto únicamente se utilizaron cálculos de vigas sujetas por puntos articulados ya que no se puede tomar como un empotrado las uniones llevadas a cabo. (17)

**4. Recipientes presurizados.** Los recipientes cilíndricos presurizados están sometidos a esfuerzos radiales y tangenciales que dependen del radio del elemento que se esté analizando. (38)

En la Ilustración  $r_i$  es el radio interior del cilindro,  $r_o$  es el radio exterior, la presión interna es  $P_i$  y la presión externa es  $P_o$ . Los esfuerzos tangencial ( $\sigma_t$ ) y radial ( $\sigma_r$ ) son:

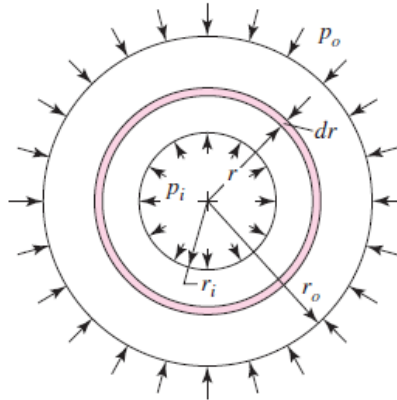
$$\sigma_t = \frac{p_i r_i^2 - p_o r_o^2 - r_i^2 r_o^2 (p_o - p_i) / r^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

Ecuación 8. Esfuerzo tangencial

$$\sigma_r = \frac{p_i r_i^2 - p_o r_o^2 + r_i^2 r_o^2 (p_o - p_i) / r^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

Ecuación 9. Esfuerzo radial

Ilustración 11: Cilindro sometido a presión interna y externa.



(17)

En las ecuaciones dadas anteriormente, los valores positivos indican tensión y los negativos, compresión. (38)

En el caso que el cilindro no está sometido a una presión externa que no sea la atmosférica,  $p_o$  se considera como 0, y por lo tanto las ecuaciones a utilizar son:

$$\sigma_t = \frac{r_i^2 p_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r_i^2}\right)$$

Ecuación 10. Esfuerzo tangencial

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 p_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r_i^2}\right)$$

Ecuación 11. Esfuerzo radial

En un cilindro cerrado, el esfuerzo longitudinal  $\sigma_l$  se produce debido a la presión sobre los extremos del recipiente. Este esfuerzo es el siguiente:

$$\sigma_l = \frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

Ecuación 12. Esfuerzo longitudinal

En los recipientes de pared delgada, cuando el espesor de la pared de un recipiente cilíndrico a presión es un vigésimo de su radio o menos, el esfuerzo radial se considera insignificante comparado con el esfuerzo tangencial, por lo que no se toma en cuenta. (38)

Los factores que se utilizan para encontrar este esfuerzo son una presión interna  $p$ , un espesor  $t$  y el diámetro interior  $d_i$ . Para un recipiente de pared delgada, una aproximación del esfuerzo tangencial mínimo es:

$$\sigma_t = \frac{p(d_i + t)}{2t}$$

**Ecuación 13. Esfuerzo tangencial mínimo**

Y el esfuerzo longitudinal es:

$$\sigma_t = \frac{pd_i}{4t}$$

**Ecuación 14. Esfuerzo longitudinal**

**5. Conchas cónicas.** Al aplicar una presión interna a un cono de pared delgada, los esfuerzos por flexión y las fuerzas cortantes transversales existen pero también son ignorados por ser tan pequeñas. De esta manera, el esfuerzo tangencial del cono se obtiene mediante la ecuación:

$$\sigma_t = \frac{pr}{t \cos \alpha}$$

**Ecuación 15. Esfuerzo tangencial sobre un cono**

Y el esfuerzo longitudinal es:

$$\sigma_l = \frac{pr}{2t \cos \alpha}$$

**Ecuación 16. Esfuerzo longitudinal en un cono**

Siendo  $p$  la presión interna,  $r$  el radio máximo del cono,  $t$  el grosor de la lámina y  $\alpha$  el medio ángulo del ápice del cono. (38)

## D. Mecánica de fluidos

La mecánica de fluidos es la que se encarga de estudiar las fuerzas que actúan sobre los fluidos. Un fluido se define como una sustancia que se deforma continuamente, es decir, que fluye bajo la acción de un esfuerzo cortante. (28)

Los fluidos son capaces de tener energía almacenada de varios tipos:

- Interna
- Potencial
- Cinética
- Calorífica

En el caso en que cualquiera de éstas se mantenga constante no es necesaria tomarla en cuenta al momento de hacer cálculos. (28)

Con el principio de la conservación de la energía que nos indica que ésta no se crea ni se destruye, si no que únicamente se transforma, se define la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_0}{\rho g} + \frac{V_0^2}{2g} + z_0 = \frac{P_f}{\rho g} + \frac{V_f^2}{2g} + z_f + h_t$$

**Ecuación 17. Ecuación de Bernoulli**

$P$  = Presión del fluido

$V$  = Velocidad de desplazamiento

$z$  = Altura

$\rho$  = Densidad

$g$  = Gravedad

$h_t$  = Pérdidas (por largo de tubería, accesorios, etc) (28)

Las pérdidas de presión en tuberías son causadas por la fricción del fluido en contacto con la superficie de la tubería y por la fricción de las partículas entre sí. Es por esto que cualquier irregularidad en una tubería causará turbulencia que representa un incremento en las pérdidas. Para calcular las pérdidas en una tubería se separan por accesorios y por la tubería en sí. (28)

Las pérdidas por fricción se calculan de la siguiente manera:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

**Ecuación 18. Pérdidas por fricción**

$f$  = Coeficiente de fricción de tubería

$L$  = Largo de tubería

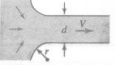
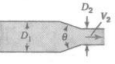
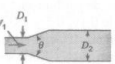
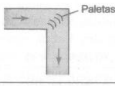
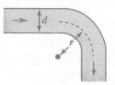
$D$  = Diámetro de tubería

$V$  = Velocidad del fluido

$g$  = Gravedad (28)

Para determinar el coeficiente de pérdida de cada accesorio se utiliza la siguiente tabla.

**Ilustración 12: Coeficiente de pérdida por accesorio.**

TABLA 10.3 COEFICIENTES DE PÉRDIDA PARA VARIAS TRANSICIONES Y CONEXIONES				
Descripción	Dibujo	Datos adicionales	$K$	Fuente
Entrada de tubo $h_L = K_e V^2 / 2g$		$r/d$	$K_e$	(2)*
		0.0	0.50	
		0.1	0.12	
		>0.2	0.03	
Contracción		$D_2/D_1$	$K_C$	$K_C$
		0.0	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 180^\circ$
		0.20	0.08	0.50
		0.40	0.08	0.49
		0.60	0.07	0.42
		0.80	0.06	0.27
		0.90	0.06	0.20
			0.10	0.10
$h_L = K_C V^2 / 2g$				(2)
Expansión		$D_1/D_2$	$K_E$	$K_E$
		0.0	$\theta = 20^\circ$	$\theta = 180^\circ$
		0.20	0.30	1.00
		0.40	0.25	0.87
		0.60	0.15	0.70
		0.80	0.10	0.41
			0.15	0.15
$h_L = K_E V^2 / 2g$				(2)
Vuelta en codo 90°		Paletas	Sin paletas	$K_b = 1.1$
			Con paletas	$K_b = 0.2$
				(39)
Vuelta suave 90°		$r/d$		(5)
		1	$K_b = 0.35$	(15)
		2	0.19	
		4	0.16	
		6	0.21	
		8	0.28	
		10	0.32	
Válvula de globo; abierta por completo			$K_v = 10.0$	(39)
Válvula de ángulo; abierta por completo			$K_v = 5.0$	
Válvula de compuerta; abierta por completo			$K_v = 0.2$	
Válvula de compuerta; abierta a la mitad			$K_v = 5.6$	
Vuelta de retorno			$K_b = 2.2$	
Tee				
Conexiones roscadas para tubo				
Con flujo recto			$K_c = 0.4$	
Con salida de flujo lateral			$K_c = 1.8$	
Codo de 90°			$K_b = 0.9$	
Codo de 45°			$K_b = 0.4$	

(28)

Las pérdidas por accesorios se calculan de la siguiente manera:

$$h_L = k \frac{V^2}{2g}$$

**Ecuación 19. Pérdidas por accesorios**

$k$  = Coeficiente de pérdida por accesorio

$L$  = Largo de tubería

$D$  = Diámetro de tubería

$V$  = Velocidad del fluido

$g$  = Gravedad (28)

**1. Tubería.** La tubería o cañería es un conducto que cumple la función de transportar agua u otros fluidos. Se suele elaborar con materiales muy diversos. (5)

**a. Mangueras de gas.** El biogás al igual que las aguas residuales son fluidos que comparten comportamientos y propiedades. Por otro lado ciertas características tienen gran variación en sus magnitudes, haciendo que los cálculos tengan otros enfoques. Por ejemplo la densidad de un líquido en relación a un gas es tan diferente que hace suponer que en una tubería de gas se tiene una presión constante mientras que en un líquido la altura del líquido no es algo despreciable. En el sistema se utilizarán tanques presurizados a presiones no mayores a 30 psi, por lo que se usará esta información para desarrollar el diseño.

**b. Válvulas.** Una válvula es un elemento que en un sistema de tubería cumple con alguna de las siguientes funciones:

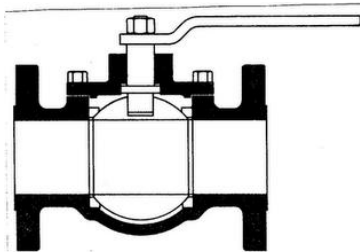
- Cierra por completo el flujo
- Controla el flujo
- Previene contraflujo (5)

Por flujo se refiere al movimiento de un fluido. Dependiendo del tipo de cierre o control, pueden existir varios tipos de válvulas. Las principales son:

- **Válvula de Bola:** realiza las funciones de apertura y cierre del flujo. Se caracteriza por tener como mecanismo regulador una bola perforada en la parte interna que es la que controla el flujo. Se abre mediante el giro del eje unido a la esfera, permitiendo el paso del fluido cuando está alineada la perforación con la entrada y

la salida de la válvula. Cuando la válvula está cerrada, el agujero estará perpendicular a la entrada y a la salida. (5)

**Ilustración 13: Válvula de Bola**

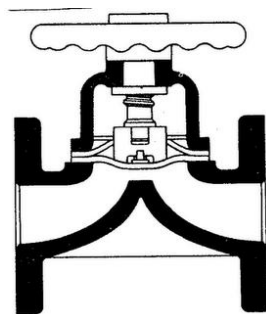


Fuente: Válvulas de control.

Fuente: <http://raa-beltran-munguia-bizmar.blogspot.com/2010/11/valvulas-de-control.html>

- Válvula de Cheque: válvula que evita el retorno del flujo.
- Válvula de Diafragma: realiza función de apertura o cierre de flujo. Se caracteriza por tener un diafragma que es el que corta el flujo o lo deja pasar. Se utiliza cuando el fluido es altamente corrosivo. (5)

**Ilustración 14. Válvula de Diafragma**

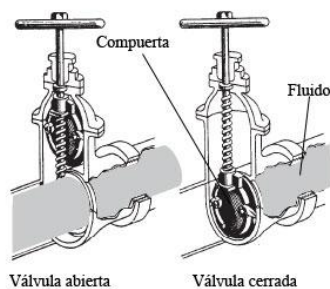


Fuente: Válvulas de control.

<http://raa-beltran-munguia-bizmar.blogspot.com/2010/11/valvulas-de-control.html>

- Válvula de Compuerta: utilizada para apertura y cierre de flujos en diámetros mayores. Funcionan con un mecanismo de guillotina que es la “compuerta” que cierra o abre el flujo. (5)

**Ilustración 15. Válvula de Compuerta**



Fuente: Conceptos básicos de mecánica e hidráulica  
[http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica\\_hidraulica30.htm](http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica_hidraulica30.htm)

- Válvula de Mariposa: permite o restringe el paso de flujo aumentando o reduciendo la sección de paso mediante una placa (mariposa), que gira sobre un eje. Tiene una baja pérdida de carga al estar abierta. (5)

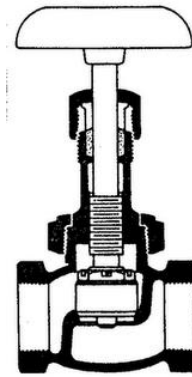
**Ilustración 16. Válvula de Mariposa**



Fuente: Válvulas de control. <http://raa-beltran-munguia-bizmar.blogspot.com/2010/11/valvulas-de-control.html>

- Válvula de Globo: utilizada principalmente si se quiere controlar el flujo. Funciona ocasionándole al flujo dos cambios de dirección de 90° cada uno, causando una significativa caída de presión. (5)

Ilustración 17. Válvula de Globo



Fuente: Válvulas de control. <http://raa-beltran-munguia-bizmar.blogspot.com/2010/11/valvulas-de-control.html>

**c. Tubería PVC.** El PVC (Policloruro de Vinilo) es un termoplástico que se obtiene por polimerización de Cloruro de Vinilo (CV). La resina que se obtiene es un polvo blanco, fino, inodoro y atóxico. Las propiedades de este material son dadas en la Tabla 6. Las características principales son:

- Resistencia química: no reacciona con los fluidos ni actúa como catalizador.
- Resistencia a la corrosión, debido a su resistencia química a los ácidos, sales, medios orgánicos, etc.
- Resistencia química al fuego: es auto-extinguible.
- Resistencia al ataque biológico: no le afectan microorganismos ni macroorganismos.
- Tubo flexible desde el punto de vista del diseño. Es decir se puede deformar en cierto porcentaje, sin sufrir ningún daño.
- Larga vida útil, un promedio de 50 años en condiciones normales de uso.
- Baja densidad (liviano).
- Fácil instalación: fácil manejo por ser livianas, no se requiere de herramientas especiales para cortar o unir. Se pueden instalar siendo soldadas, roscadas, bridadas o con juntas ranuradas.
- Inmune a ataque galvánico o electrolítico, por lo que se puede conectar a accesorios metálicos bajo el agua, por ser no conductor.
- No requiere mantenimiento, ya que no se oxida, no se descascara ni se corroe.
- No tóxico, es inodoro e insípido.

- Pérdida de fricción baja por la superficie interior y el material. Por no oxidarse, se garantiza que se mantendrá el caudal inicial por toda la vida útil del sistema de tubería.
- Baja conductividad térmica, manteniendo los fluidos conducidos a una temperatura más constante.
- No es dañada por suelos corrosivos ni aguas violentas. (5)

**Tabla 6: Propiedades físicas del PVC.**

Característica	Valor
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.38-1.40
Resistencia a la tracción (kg/cm <sup>2</sup> )	500-550
Elongación (%)	80-125
Módulo de Elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	30,000-40,000
Calor Específico (Cal/g°C)	0.25
Coefficiente de dilatación lineal (m/m°C)	$7 \times 10^{-5} - 8 \times 10^{-5}$
Conductividad térmica (Kcal/mh°C)	0.13-0.15
Temperatura de ablandamiento Vicat (°C)	76-80

(5)

En la tubería PVC el ensamblaje puede realizarse por medio de varios elementos entre los que están:

- Uniones fijas
  - Cementada: debe cumplir principios básicos de cementado.
  - Con enchufe: se expande un extremo de tubo formando una campana e insertando la otra pieza en la misma.
  - Con manguitos o coplas lisas: empalma dos extremos macho.
- Soldada: utilizando pegamento.
- Uniones desmontables
  - Bidas: es para tuberías sometidas a presión.
  - Roscas: menos económico y seguro que los demás.
- Válvulas de bola
- Válvulas de mariposa

- Válvulas de diafragma
- Codos de 90 y 45°.
- Tees, reducciones, acoples roscados macho y hembra, unión universal, tapas roscadas macho, hembra y lisas y demás acoples.

Los materiales necesarios son bastante básicos:

- Sierra de arco.
- Trapo o toalla limpiadora.
- Pegamento para PVC.

Cabe mencionar que las válvulas de bola de PVC son capaces de conducir caudales con mayor eficiencia y con pérdidas de carga menores que las válvulas de bola de bronce. (5)

**d. Tubería de gas.** Técnicamente, trabajar con tubería de gas no es tan diferente de trabajar tubería de agua. Para combustible doméstico, el gas viene en dos formas: gas natural, que es distribuido en tubería, y gas licuado que es contenido en un tanque o cilindro. (27)

Los materiales requeridos son:

- Llave inglesa.
- Compuesto para rosca de tubo de gas
- Solución detectora de fugas
- Cinta de teflón

En la Ilustración 8 se muestran los tipos de tubos que pueden ser utilizados. El primer tubo (A) es de acero. Éste es el material tradicional para las líneas de gas y es aplicable en cualquier lado pero es e menos práctico. La segunda manguera (B, amarilla) es tubo de acero inoxidable acanalado y revestido con PVC, por su flexibilidad es posible hacer menos conexiones y disminuye la posibilidad de fugas. En algunas regiones no es permitido. (27)

El siguiente tubo(C) es el tubo flexible que se utiliza para conectar aparatos a líneas de suministro. El cobre blando (D) puede ser usado para gas en algunas regiones, pero no es permitido en otras jurisdicciones. (27)

**Ilustración 18. Tubos para instalación de gas**



Fuente: Creative Publishing International, Editors of CPi. 2009

Las válvulas y uniones son parecidas a las usadas para agua, pero se deben usar sólo en instalaciones de gas. En la Ilustración 9 se muestran ejemplos de las mismas. (27)

Las válvulas de un cuarto de giro se consiguen en conexiones roscadas abocinadas (con forma de bocina). Las uniones están disponibles en muchos tamaños medidos por el diámetro externo; pueden ser roscadas o abocinadas y de tipo macho o hembra. El compuesto para rosca y la solución detectora de fugas son importantes. (27)

**Ilustración 19. Válvulas y uniones para distribución de gas**



Fuente: Creative Publishing International, Editors of CPi. 2009

Como tubo flexible se pueden usar varias clases y tipos, incluyendo mangueras. Existen mangueras de teflón con alta resistencia a la corrosión y un amplio rango de presiones (arriba de 200 psi) y temperaturas. Existen también mangueras PVC flexibles que se pueden usar para distintos tipos de fluidos. Para bajas presiones (menos de 200 psi) se puede utilizar manguera de

vinyl transparente o reforzada. Estas mangueras se pueden cortar y acoplar a conexiones simples. Entre estas conexiones simples se encuentran niples de bronce con rosca NPT o vástagos. (27)

En los vástagos largos y los niples se pueden instalar abrazaderas para lograr un sello seguro entre la conexión y la manguera. Las abrazaderas pueden ser:

- Tornillo sin fin: usan una herramienta hexagonal para apretarse o bien para aflojarse.
- De golpe en el centro: utilizan un mazo para golpear la herramienta después de haber sido tensionada la abrazadera.
- Doble tornillo: hecha de metal acero maleable acabado rugoso con tornillo y tuercas hexagonales. La superficie interna es acanalada para mejor agarre.
- Doble tornillo en forma de espiral: se recomienda para manguera PVC de acabado en forma de espiral. (27)

## E. Control de temperatura y medición de presión en Biodigestores

Como se mencionó anteriormente, los Biodigestores varían su producción dependiendo de la temperatura y la presión, por lo que es importante la medición de ambos. Además, la temperatura es fácilmente controlable utilizando un microcontrolador. A continuación se detallan los instrumentos utilizados para la medición de ambas variables y para el control de la temperatura.

**1. Sensores.** Un sensor es un dispositivo capaz de transformar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, en magnitudes eléctricas. Las variables de instrumentación dependen del tipo de sensor y pueden ser por ejemplo temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, pH, etc. una magnitud eléctrica obtenida puede ser una resistencia eléctrica (como en una RTD), una capacidad eléctrica (como en un sensor de humedad), una tensión eléctrica (como en un termopar), una corriente eléctrica (como un fototransistor), etc. (4)

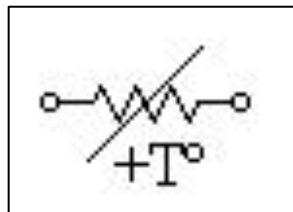
Un sensor se diferencia de un transductor en que el sensor está siempre en contacto con la variable a medir o a controlar. Hay sensores que no sólo sirven para medir la variable, sino también para convertirla mediante circuitos electrónicos en una señal estándar (4 a 20 mA ó 1 a 5 VDC) para tener una relación lineal con los cambios de la variable sensada dentro de un rango, para fines de control de dicha variable en un proceso. (4)

Entre las características técnicas de un sensor destacan las siguientes:

- Rango de medida: Dominio en la magnitud medida en el que puede aplicarse el sensor.
- Precisión: Se le conoce como el error de medida máximo esperado.
- Offset o desviación de cero: Valor de la variable de salida cuando la variable de entrada es nula. Si en dado caso el rango de medida no llega a valores nulos de la variable de entrada, habitualmente se establece otro punto de referencia para definirse el offset.
- Sensibilidad: Relación entre la variación de la magnitud de salida y la variación de la magnitud de entrada.
- Resolución: Mínima variación de la magnitud de entrada que puede apreciarse a la salida.
- Rapidez de respuesta: Puede ser un tiempo determinado o en relación de cuánto varíe la magnitud a medir.
- Repetitividad: Error esperado al repetir varias veces la misma medida. (4)

**2. Sensor de temperatura RTD.** Los sensores de temperatura resistivos (RTD - Resistance Temperatura Detector) son sensores de temperatura basados en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. El símbolo que los representa se puede observar en la Ilustración 5, en el que se indica una variación lineal con coeficiente de temperatura positivo. (4)

Ilustración 20. Símbolo RTD



Al calentarse un metal habrá una mayor agitación térmica, dispersándose más los electrones y reduciéndose su velocidad media, aumentando la resistencia. A mayor temperatura, mayor agitación y mayor resistencia. (4)

La variación de la resistencia puede ser expresada de manera polinómica como se puede observar en la Ecuación #21. Por lo general la variación es bastante lineal en márgenes amplios de temperatura. (4)

$$R = R_o * (1 + \alpha * \Delta T)$$

**Ecuación 20. Variación de resistencia en RTD**

donde:

- $R_o$  es la resistencia a la temperatura de referencia  $T_o$
- $\Delta T$  es la desviación de temperatura respecto a  $T_o$  ( $\Delta T = T - T_o$ )
- $\alpha$  es el coeficiente de temperatura del conductor especificado a  $0^\circ\text{C}$  [7]

Los materiales empleados para la construcción de sensores RTD suelen ser conductores tales como el cobre, el níquel o el platino. Las propiedades de algunos de éstos se muestran en la Tabla #7: (4)

**Tabla 7: Materiales comunes para RTD**

Parámetro	Platino (Pt)	Cobre (Cu)	Níquel (Ni)	Molibdeno (Mo)
<b>Resistividad (<math>\mu\Omega\text{cm}</math>)</b>	10.6	1.673	6.844	5.7
<b><math>\alpha(\Omega/\Omega/\text{K})</math></b>	0.00385	0.0043	0.00681	0.003786
<b><math>R_o(\Omega)</math></b>	25, 50, 100, 200	10	50, 100, 120	100, 200, 500
<b>Margen (<math>^\circ\text{C}</math>)</b>	-200 a +850	-200 a +260	-80 a +230	-200 a +200

(4)

De todos los materiales mostrados en la Tabla 1, el platino es el que ofrece mejores prestaciones como:

- Alta resistividad
- Margen de temperatura mayor
- Alta linealidad

Ilustración 21: Sensor RTD



Entre algunas ventajas de los sensores RTD en comparación con otros sensores de temperatura utilizados en la industria se tienen:

- Margen de temperatura bastante amplio
- Proporcionan las medidas de temperatura con mayor exactitud y repetitividad
- El valor de resistencia del sensor RTD puede ser ajustado con gran exactitud por el fabricante
- Los sensores RTD son más estables con el tiempo
- La relación entre la temperatura y la resistencia es la más lineal
- A diferencia de los termopares, no son necesarios cables de interconexión especiales ni compensación de la unión de referencia (4)

**3. Pt100.** Una Pt100 es un sensor de temperatura RTD que consiste de un alambre de platino que a 0 °C presenta una resistencia de 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. En el Tabla 2 se observan valores estándar de resistencia a distintas temperaturas para un sensor PT100. (4)

Tabla 8:Valores estándar resistencia para PT100

Temperatura (°C)	0	20	40	60	80	100
Resistencia ( $\Omega$ )	100	107.79	115.54	123.24	130.87	138.50

(4)

Entre las ventajas de las Pt100 en comparación que las termocuplas es que las superan especialmente en aplicaciones de bajas temperaturas. (-100 a 200 °C). Los Pt100 pueden

fácilmente entregar precisiones de una décima de grado con la ventaja que la Pt100 no se descompone gradualmente entregando lecturas erróneas. (4)

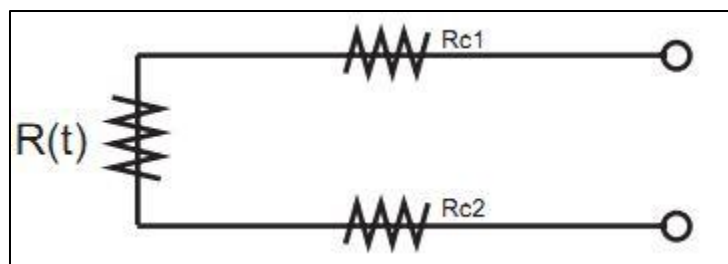
Además la Pt100 puede ser colocada a cierta distancia del medidor sin mayor problema (hasta unos 30 metros) utilizando cables de cobre convencional para hacer la extensión. (4)

**Ilustración 22: Sensor PT100**



**a. Conexión de la Pt100 a 2 hilos.** Este es el modo más sencillo de conexión, en este caso las resistencias de los cables  $R_{c1}$  y  $R_{c2}$  que unen la Pt100 al instrumento se suman generando un error inevitable. El lector medirá el total  $R(t) + R_{c1} + R_{c2}$  en vez de solamente  $R(t)$ . La única opción que se tiene para disminuir la resistencia del cable es hacerlo lo más grueso posible, un cable común razonablemente grueso sería uno de diámetro equivalente a 18 AWG. (4)

**Ilustración 23: Conexión a 2 hilos Pt100**



**b. Autocalentamiento y corriente de excitación.** Cualquiera que sea el método de conexión, se debe hacer pasar una corriente por el elemento sensor para poder medir su resistencia. Esta corriente llamada "corriente de excitación" la suministra el instrumento lector y es del orden de 0.1 mA a 2 mA dependiendo del modelo y marca del equipo. Un problema que puede ocurrir es cuando la corriente de excitación genera por efecto Joule ( $P = I^2R$ ) un

calentamiento del elemento sensor aumentando su temperatura y produciendo así un error en la lectura. (4)

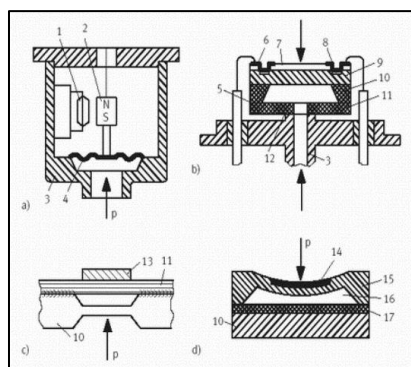
Este problema es más pronunciado mientras más pequeña sea la Pt100 (debido a que tiene menor capacidad de disipación de calor generado) y a la vez mientras se esté midiendo en un medio menos conductor de calor. (4)

**4. Sensor de presión.** En la industria se encuentra en amplio rango de sensores de presión, la mayoría orientados a medir la presión de un fluido sobre una membrana. (4)

Los dispositivos piezorresistivos de silicio sensibles a la presión, proporcionan una variación de tensión exacta y directamente proporcional a la presión que se les aplica. El sensor consta de un diafragma monolítico de silicio para medir el esfuerzo y una fina película con una red de resistencias integradas en un integrado. El integrado se ajusta, calibra y compensa en temperatura por láser. (4)

En los sensores electrónicos en general, la presión actúa sobre una membrana elástica, midiendo la flexión. Para detectarla pueden aprovecharse diversos principios físicos, tales como inductivos, capacitivos, piezorresistivos, ópticos, monolíticos u óhmicos. (4)

**Ilustración 24: Esquema interior sensores de presión**



El sensor #67CP662 de Sensata Inc. es un transductor de presión manométrica que convierte la presión sensada en un voltaje entre 0.5 y 4.5 Vdc, el diseño no requiere el uso de amplificadores, este sensor es ideal para aplicaciones industriales, pruebas de presión, etc. A continuación se detallan las características del sensor #67CP662:

- Alta precisión  $\pm 0.6\%$
- Alto rango de compensación de temperatura (-20 a +85 °C)
- Voltaje de alimentación entre 4.5 - 5.0 Vdc

- Corriente de alimentación de 7 mA
- Rango de presión manométrica entre 0 y 100 psi.
- Respuesta de salida en el tiempo de 10 ms max.
- Conexión de 3 terminales (+V, GND y Output). (4)

**Ilustración 25: Sensor de presión #67CP662**



**5. Aumento de temperatura en Biodigestor.** Para aumentar la temperatura del desecho orgánico se pueden utilizar una serie de resistencias eléctricas acopladas alrededor del Biodigestor, las cuales se alimentan por medio de una fuente de voltaje alterno.

La resistencia eléctrica es toda oposición que se encuentra la corriente a su paso por un circuito eléctrico cerrado, atenuando o frenando el libre flujo de circulación de las cargas eléctricas o electrones. Cualquier dispositivo o consumidor conectado a un circuito eléctrico representa en sí una carga, resistencia u obstáculo para la circulación de la corriente eléctrica. (79)

La potencia eléctrica es la velocidad a la que se consume la energía, también se puede definir potencia como la energía desarrollada o consumida en una unidad de tiempo. Para calcular la potencia que consume un dispositivo (como una resistencia eléctrica) conectado a un circuito eléctrico se multiplica el valor de la tensión RMS, en volt (V), aplicada por el valor de la intensidad (I) que lo recorre (expresada en ampere). (79)

En un sistema herméticamente aislado, la cantidad de calor  $Q$  se define como la energía necesaria para aumentar la temperatura de una determinada masa desde una temperatura inicial  $T_i$  hacia una temperatura final  $T_f$ .

$$Q = m * ce * \Delta T$$

Donde:

- Q es la cantidad de energía en Joules
- m es la masa en Kilogramos
- ce es el calor específico en J / (kg \* °C)
- $\Delta T$  es el cambio de temperatura en °C

## F. Biogás

El biogás es uno de los productos de la descomposición anaeróbica. Éste consiste principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene algunas impurezas. Las propiedades para la composición específica indicada se enlistan en la siguiente tabla:

**Tabla 9: Características del biogás**

<b>Composición</b>	55-70% metano 30-45% de dióxido de carbono Trazas de otros gases.
<b>Contenido energético</b>	21.6-23.4 kJ/L
<b>Equivalente combustible</b>	0.00060-0.00065 m <sup>3</sup> aceite/ m <sup>3</sup>
<b>Límites de explosión</b>	6-12% biogás en aire
<b>Temperatura de ignición</b>	650-750°C
<b>Presión crítica</b>	0.75-0.89 Pa
<b>Temperatura crítica</b>	-82.5°C
<b>Densidad normal</b>	1.2 kg/ m <sup>3</sup>
<b>Olor</b>	Huevos podridos (debido al azufre)
<b>Masa molar</b>	16.043 kg/kmol

(32)

El poder calorífico del biogás que se utilizará como referencia en este trabajo será la proporción de 26 J/cm<sup>3</sup> que equivale a 26,000kJ/ m<sup>3</sup>, es un estimado del potencial del biogás que se está generando. (10)

Como se mencionó anteriormente, los componentes del gas son específicos a la planta y del sustrato. La siguiente tabla muestra específicamente la composición del biogás obtenido a partir de la descomposición anaeróbica de aguas residuales.

**Tabla 10: Composición del biogás producido a partir de aguas residuales**

Compuestos/características	Valor
Metano	65-75%
Butano	<300 mg/Nm <sup>3</sup>
Dióxido de carbono	20-35%
Monóxido de carbono	<0.2%
Nitrógeno	3.4%
Oxígeno	0.5%
Hidrógeno	Trazas
Sulfuro de hidrógeno	<8000 mg/N m <sup>3</sup>
Siloxanos	<0.1-5.0 mg/N m <sup>3</sup>
Benceno, tolueno, xileno	<0.1-5.0 mg/N m <sup>3</sup>
CFC	0
Aceite	Trazas
Poder calorífico neto	6.0-7.5 kWh/Nm <sup>3</sup>
Densidad normal	1.16 kg/N m <sup>3</sup>
Humedad relativa	100%
Punto de rocío	35°C

(32)

El metano es el compuesto que le da al biogás su propiedad combustible, por lo que se desea la mayor concentración de éste en el biogás. La siguiente tabla muestra el efecto de cada componente en el biogás.

Tabla 11. Efecto de los componentes del biogás

Componente	Contenido	Efecto
Dióxido de carbono	25%-50% en volumen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminuye el poder calorífico del gas.</li> <li>• Causa corrosión si el gas está mojado.</li> <li>• Daña las celdas de combustible.</li> </ul>
Sulfuro de hidrógeno	0%-0.5% en volumen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efecto corrosivo en el equipo y tuberías.</li> <li>• Arruina los catalizadores.</li> </ul>
Amoníaco	0%-0.5% en volumen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emisiones de NO<sub>x</sub></li> <li>• Aumenta las propiedades anti-golpes de los motores.</li> </ul>
Vapor de agua	1%-5% en volumen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Causa corrosión del equipo y tuberías.</li> <li>• Los condensados dañan los instrumentos y las plantas.</li> </ul>

(32)

La proporción de dióxido de carbono y metano en el biogás no puede controlarse completamente, ésta depende de los siguientes factores:

- La adición de compuestos con cadenas largas de carbono, por ejemplo: materiales ricos en grasas.
- A mayor tiempo de retención la descomposición de la biomasa mejora. Al final del periodo de descomposición el contenido de metano aumenta.
- El proceso de fermentación ocurre más rápido si el material en el biorreactor está homogéneamente activado.
- A mayor temperatura, menor es la concentración de CO<sub>2</sub> disuelta en el líquido, por lo que se disuelve en el gas.
- Una alta presión conlleva una mayor concentración de CO<sub>2</sub> disuelta en el líquido, por lo que disminuye su concentración en el gas.

1. **Generación promedio por m<sup>3</sup> de aguas residuales.** De acuerdo a resultados obtenidos por distintos Biodigestores que se han implementado para el desarrollo y aprovechamiento del biogás, se definió que para los Biodigestores estándar que utilizan desechos animales diluidos se puede generalizar un estimado de 0.455m<sup>3</sup> biogás/ m<sup>3</sup> de desechos diluidos a una temperatura ambiente. Para efectos del análisis del potencial de generación de biogás de la Universidad se utilizará este factor de generación para estimar los resultados. (3, 10)

2. **Aplicaciones del biogás.** Para las distintas aplicaciones y usos que se le puede dar al biogás, se han desarrollado varios estudios que permiten determinar en forma generalizada las tasas de consumo de biogás para ciertas aplicaciones específicas.

**Tabla 12: Aplicaciones frecuentes para el biogás y sus ritmos de consumo**

Usos	Cantidad Requerida (m <sup>3</sup> )	Tasa de uso de aplicación
<b>Cocina</b>	0.32	Quemador de 5cm de diámetro/hora
	0.46	Quemador de 10cm de diámetro/hora
	0.63	Quemador de 15cm de diámetro/hora
	0.42	por persona/día
	0.7	Agua hirviendo/litro
<b>Iluminación</b>	0.07	Lámpara de mantilla/hora
<b>Refrigeración</b>	1.07	m <sup>3</sup> refrigerado/hora
<b>Incubadora</b>	0.71	m <sup>3</sup> incubado/hora
<b>Motor de gasolina *</b>	0.6	Por kW/h
<b>* se considera un motor con eficiencia de 25%</b>		

(3, 10)

Las aplicaciones anteriores se mencionan como referencia a los usos más frecuentes que se le da al biogás en la actualidad. Sin embargo en este estudio se enfocó el estudio de la factibilidad financiera para aplicar el biogás producido para la generación de energía eléctrica. Se analizará el beneficio económico que su implementación puede representar, tomando en cuenta que por cada kWh generado se tiene un ingreso de Q.1.56 en equivalencia al costo de kWh aplicado por las empresas de distribución de energía. (3, 10)

Para determinar la composición del biogás se puede emplear la cromatografía de gases:

## G. Cromatografía de gases

La cromatografía es un método de separación que se basa en la diferencia de afinidades de los componentes de una mezcla hacia una fase estacionaria. Las separaciones cromatográficas involucran a una fase móvil, en la que se encuentra disuelta la muestra, que se mueve a través de una fase estacionaria inmisible fija en una columna o en una superficie sólida. Los componentes de la muestra se distribuyen de diferente forma entre la fase móvil y la fase estacionaria. Hay componentes que son fuertemente retenidos por la fase estacionaria y por lo tanto se mueven muy

lentamente sobre ella, otros componentes se retienen débilmente a la fase estacionaria, por lo que se mueven con rapidez. Debido a las diferentes velocidades de migración, los componentes de la muestra se separan en regiones o bandas que se pueden analizar cualitativa y cuantitativamente. (73)

Los métodos cromatográficos pueden clasificarse según el estado físico de sus fases móviles; de esta forma se pueden mencionar la cromatografía de gases (CG), la cromatografía de líquidos (CL) y la cromatografía de fluidos supercríticos (CFS). (73)

En específico, la cromatografía de gases puede dividirse en cromatografía gas-sólido y en cromatografía gas-líquido. La primera tiene una aplicación bastante limitada, mientras la segunda tiene variedad de aplicaciones y es la que comúnmente se abrevia como cromatografía de gases. En la cromatografía gas-líquido el analito se reparte entre la fase móvil gaseosa y la fase líquida que se encuentra sobre la superficie de un relleno sólido inerte o en las paredes de un tubo capilar. (73)

La cromatografía de gases se utiliza, usualmente, para separar muestras orgánicas complejas, organometálicas y sistemas bioquímicos conformados por especies volátiles. Además, la cromatografía de gases puede utilizarse para un análisis cuantitativo y cualitativo de los componentes de la mezcla. Para el análisis cualitativo pueden emplearse los tiempos de retención, es decir, los tiempos diferenciales que tardan los componentes de la mezcla en eluir o salir de la columna; sin embargo, actualmente se utilizan sistemas de detección que pueden identificar los solutos. Para el análisis cuantitativo pueden usarse las alturas de los picos o sus áreas relativas. (73)

A continuación se describen los componentes de un sistema de cromatografía gas-líquido:

1. **Sistema de gas portador.** El gas portador es la fase móvil y debe ser químicamente inerte a la muestra y con la fase estacionaria. Generalmente, se utiliza helio, aunque también se utiliza argón, nitrógeno e hidrógeno. La presión del gas debe estar regulada, así como su flujo, para que la separación se lleve a cabo de la manera deseada. (73)

2. **La columna y hornos para la columna.** Se usan dos tipos de columnas: las empacadas y las capilares. Actualmente, las segundas son las de mayor aplicación. Para poder colocar las columnas dentro de un horno y así poder controlar la temperatura, se les da forma helicoidal con diámetros de 10 a 30 cm.

Una de las variables más importantes de controlar es la temperatura de la columna. La temperatura óptima depende del punto de ebullición de la muestra y del grado de separación que se requiera. Generalmente, utilizando una temperatura igual o un poco mayor al punto de ebullición promedio de la muestra se obtienen tiempos de elución de 2 a 30 minutos. También pueden utilizarse programas de temperatura para aumentar gradualmente la temperatura en forma continua, lo que mejora la separación. Al utilizar la temperatura mínima posible, se mejora la resolución, pero esto también puede provocar tiempos demasiado largos para completar el análisis. (73)

3. **Sistemas de detección.** El sistema de detección es el que nota la elución de cada uno de los componentes de la mezcla. Los detectores deben tener una sensibilidad adecuada, además de una buena estabilidad y reproducibilidad. También se requiere una respuesta lineal para los solutos, un tiempo de respuesta corto, alta confiabilidad y, de preferencia, no debe destruir la muestra. A continuación se presenta una tabla listando los detectores característicos para cromatografía de gases:

**Tabla 13: Detectores característicos para cromatografía de gases**

Tipo	Muestras aplicables
Ionización por llama	Hidrocarburos
Conductividad térmica	Detector universal
Captura de electrones	Compuestos halogenados
Espectrómetro de masas (EM)	Sintonizable para cualquier especie
Termoiónico	Nitrógeno y compuestos de fósforo
Conductividad electrolítica	Compuestos que contienen halógenos, azufre o nitrógeno
Fotoionización	Compuestos ionizados mediante radiación UV.
Infrarrojo de transformada de Fourier (FTIR)	Compuestos orgánicos.

(73)

## H. Fosas sépticas

Una fosa séptica consiste en una cámara rectangular o cilíndrica hermética, la cual se construye de concreto o polietilenos de alta densidad. Las fosas sépticas se localizan debajo

del nivel del suelo y conforman un sistema de tratamiento primario de aguas residuales, en las que se almacenan los lodos provenientes de desechos orgánicos. (69)

1. **Función.** La función principal de una fosa séptica consiste en el almacenamiento de lodos y natas, los cuales son sometidos a descomposición por procesos naturales. Esta descomposición permite que el grado de contaminación que aporten las fosas sea el mínimo posible. (69)

2. **Diseño.** La información fundamental que se requiere para el diseño de una fosa séptica consiste en que el tamaño de retención de la fosa séptica viene dado por el número de personas que habitan o que pasan tiempo completo en una institución u hogar. De acuerdo a las dimensiones sugeridas por MAPRECO, empresa dedicada a servicios de construcción, mantenimiento de fosas sépticas y tratamiento de aguas residuales, se debe tener 0.2m<sup>3</sup> por cada persona. Se define que la capacidad máxima de llenado de una fosa séptica es del 75% del volumen total. (69)

3. **Limpieza.** De acuerdo a las recomendaciones de MAPRECO, para el mantenimiento de las fosas sépticas, se debe tener en cuenta que éstas se llenan en un 75% cada 12 meses, por lo que para mantener un control correcto de la limpieza y el estado de la fosa séptica, es recomendable que se realice un estudio profundo en el diseño de la fosa, con el fin de que esta soporte a todas las personas y la actividad de la institución u hogar. (69)

## I. Demanda Bioquímica de Oxígeno

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es un parámetro importante en el estudio y caracterización de aguas no potables. Es la cantidad de oxígeno que deben consumir los microorganismos para degradar los materiales orgánicos en determinado sustrato a 20°C. Indica la presencia y biodegradabilidad del material orgánico. Es importante mencionar que la descomposición depende grandemente de la temperatura. (32)

Ya que la descomposición de la materia orgánica es un proceso biológico, el manejo y tratamiento de la muestra es delicado. Al recibir la muestra, debe de procesarse inmediatamente o guardarse en refrigeración por no más de 48 horas. El volumen de muestra a analizar debe ser representativo del total de la muestra y ésta debe estar homogenizado. La muestra es, usualmente, de unos cuantos mililitros (1-50 mL), se mezcla con un agua de dilución previamente preparada

que estabiliza el pH de la solución y puede contener algunos nutrientes para el desarrollo del medio microbiano. (32)

La demanda biológica de oxígeno se obtiene al medir el oxígeno disuelto el día en que se prepara la muestra y cinco días después, para calcular la cantidad de oxígeno consumido. Si la muestra es demasiado grande, consumirá demasiado oxígeno y éste se acabará antes de terminar la prueba, por lo que no se podría medir e invalidaría la prueba. Se desea una ecuación de la siguiente manera:



#### Ecuación 22. Degradación de materia orgánica

La siguiente tabla indica la cantidad de muestra que se requiere tomar como alícuota en un recipiente de 300 mL para tener un valor adecuado de oxígeno disuelto al final de la prueba. (32)

**Tabla 14: Diluciones recomendadas para diferentes valores esperados de DBO**

Volumen de muestra (mL)	Rango de DBO
0.10	6, 000 – 21, 000
0.50	1, 200 – 4, 200
1.0	600 – 2, 100
2.0	300 – 1, 050
5.0	120 – 420
10.0	60 – 210
20.0	30 – 105

(72)

Cuando no se tiene un estimado del valor de DBO de la muestra a analizar, se aconseja preparar diferentes botellas en varias diluciones de la muestra que se analiza.

Para el cálculo del DBO se utiliza la siguiente ecuación:

$$DBO_5 = \frac{(O_{2\text{inicial}} - O_{2\text{final}})}{(V_{\text{muestra}}/V_{\text{solución}})}$$

#### Ecuación 23. Cálculo de DBO

En la que  $O_2$  representa la concentración de oxígeno disuelto, usualmente en mg/L, y V representa el volumen, ya sea de la muestra o de la solución.

**1. Medidor de oxígeno LBOD101 IntelliCAL®.** El LBOD101 IntelliCAL® es un medidor luminiscente de oxígeno disuelto de la marca Hach. Este medidor determina fácil y rápidamente la cantidad de oxígeno disuelto en una muestra por medio de luminiscencia, por lo que ya no requiere membranas, ánodos o cátodos como otros sensores. Estos factores reducen el tiempo y costo de mantenimiento y aseguran lecturas de alta precisión. (29)

**Ilustración 26: Medidor de oxígeno disuelto HQ40d con la sonda LBOD101 IntelliCAL®**



## J. Seguridad industrial

La seguridad industrial es <<una disciplina que comprende actividades de orden técnico, legal, humano y económico que vela por el bienestar humano y la propiedad física de la empresa. Actualmente se define como una herramienta fundamental en el Control de pérdidas y en la prevención de riesgos. (42)

El objetivo de la Seguridad Industrial es prevenir los accidentes de trabajo que pueden afectar la salud y bienestar del trabajador así como la propiedad física de la empresa.>> (42)

Existen una gran cantidad de riesgos, aunque a continuación se presentan únicamente los que aplican a este trabajo de investigación. Se pueden dividir en cuatro grupos:

1. **Riesgos biológicos.** Algunas bacterias son particularmente peligrosas y se les denomina patógenas. Estas bacterias pueden estar en el ambiente en cualquier momento, lo que causa el riesgo es la concentración con la cual se encuentran presentes ya que si esta es baja, no afectará la salud de las personas; pero una vez se comienzan a reproducir pueden repercutir de manera negativa en la salud. (42)

Es por esto que «todos los materiales biológicos deben ser considerados como riesgos potenciales. Incluso cuando procedan de gente “saludable”, este material puede constituir una fuente de infección.» (42)

Entre los riesgos específicos se encuentran los siguientes:

- Rotulación de las muestras
- Eliminación de desperdicios
- Batas de laboratorio
- Auto-inoculación (42)

A continuación, se establecen algunas medidas generales de protección:

- Contención general: cuando se trabaje con parásitos y microorganismos patógenos se deben tomar precauciones para no tener contacto directo con ellos.
- Control de la infección: se deben tomar en cuenta varios puntos importantes como:
  - Protección personal: «Cuando se sospecha de un contacto entre la piel y un material infectado, la zona correspondiente deberá ser desinfectada, buscando además consejo médico. En algunos casos en que se utilizan organismos particularmente virulentos, deberán definirse las zonas de acceso limitado (...)»(42)
  - Higiene personal: Cuando las condiciones locales lo requieran, deberán utilizarse elementos protectores más complicados, tales como las máscaras, los guantes quirúrgicos, la protección de los ojos y las pantallas para la cara. Cuando sale de la zona de trabajo, el personal deberá quitarse las batas de laboratorio y el resto del equipo protector, lavándose a continuación las manos.» (42)

2. **Riesgos mecánicos.** Los riesgos mecánicos se pueden definir como <<las lesiones ocasionadas por las máquinas>> que suceden gracias al movimiento de las mismas que es necesario para su correcto funcionamiento. Existen tres formas de movimiento:

**a. Movimiento giratorio.**

- Lesiones causadas por partes en movimiento convergente

«Se produce cuando hay dos partes giratorias en contacto (o muy próximas entre ellas), una de las cuales gira como el reloj y la otra en dirección contraria. El riesgo está presente en el lado en que las dos partes convergen dando lugar a un aplastamiento.»

- Estrangulación

«Ésta se produce cuando la máquina que gira hace que algún elemento ajeno a su operación se envuelva en una parte en movimiento.»

- Acción de corte

Cuando la parte que se mueve tiene un borde agudo, como las guillotinas.

- Proyectiles

Se produce cuando un cuerpo en movimiento giratorio se rompe o de él se suelta una parte, por ejemplo las piedras de esmeril, la rotura o descarga de partículas, las virutas a consecuencia de la perforación, el barrenado o el torneado, o herramientas o partes que caen sobre sistemas de giro.

- Fricción

Cualquier superficie lisa que gira a alta velocidad puede, si se pone en contacto con la piel, ocasionar una “quemadura por fricción”. Ejemplo de ello las piedras de esmeril, los lados o rebordes de las ruedas y los árboles en giro.» (42)

**b. Movimiento de vaivén.** El mayor riesgo proveniente de este tipo de movimiento es cuando se termina el recorrido de la máquina, ya que se forma una trampa entre la parte que se mueve y la parte estacionaria de la máquina. Hay dos tipos principales de riesgo en el movimiento de vaivén:

- Acción de corte

Cuando la parte que se mueve tiene un borde agudo, como las guillotinas.

- Acción de prensado

Se puede producir un proyectil gracias al rebote que se da como consecuencia del movimiento de vaivén, siendo el riesgo mayor cuando la frecuencia del movimiento es más rápida. (42)

c. **Movimiento relativo, persona-máquina.** Este riesgo se presenta cuando una persona está en movimiento y la máquina está estacionaria. La lesión puede producirse:

- Al sufrir cortes la persona por los rebordes agudos de las máquinas, herramientas o la estructura de las máquinas o la de las piezas en que se trabaja;
- Al tropezar una persona, o chocar con las partes salientes de una máquina.” (42)

3. **Riesgos de explosión.** Las explosiones suceden cuando existe una reacción de combustión que como consecuencia emite luz, sonido, energía térmica y volúmenes de productos gaseosos. Las explosiones de gas/vapor suceden cuando hay una mezcla ya sea de gas con aire o vapor con aire que recibe una ignición que supera los límites explosivos de la mezcla. (42)

«La amplitud del daño causado depende del volumen de la mezcla explosiva, y de si ésta se encuentra limitada en un espacio cerrado.» (42)

Para detener una explosión de gas/vapor se debe de rociar un polvo, gas o vapor que no sean inflamables en la zona de explosión. Un factor que contribuye a disminuir la magnitud de la explosión es la humedad en el aire, ya que a mayor humedad menor será la magnitud de la explosión. (42)

4. **Riesgos eléctricos.** Son riesgos que derivados de la electricidad. Se define a la electricidad como «Un flujo de electrones a lo largo de un circuito cerrado. Por esto constituye una fuerza dinámica que únicamente puede ser controlada, en situaciones de riesgo, interrumpiendo el circuito». (42)

Estos riesgos pueden ser de dos tipos:

- «A las personas: los principales riesgos son por descarga eléctrica, por quemaduras directas y por lesiones secundarias consecuencia de descargas no mortales.
- A las propiedades: consecuencia de fuegos y explosiones (los que también pueden dar lugar a lesiones personales).» (42)

En los riesgos a las personas, el daño ocasionado a los tejidos depende de la corriente (en amperes) que circule por el cuerpo cuando se de el accidente, aunque también se deben de tomar en cuenta otros factores que controlan el flujo de la corriente y, por lo tanto, la gravedad de la lesión. Estos factores son el voltaje, la resistencia de la piel y de los órganos internos, el tipo de

corriente (corriente directa o alterna), la trayectoria que siga la corriente a través del cuerpo, el tiempo de contacto de la corriente con la persona y el área de contacto. (42)

No se ha determinado un valor exacto de corriente o voltaje que resulte mortal, aunque se conoce que una descarga de aproximadamente 100 mA que dure alrededor de 1 a 2 segundos puede ser mortal. Estos valores varían de persona en persona y de la situación en la que se encuentre, ya que para una persona sensible un voltaje de 30 mA puede resultar mortal y la lesión puede ser mayor por ejemplo si la persona tiene palmas sudorosas o no. Las palmas ofrecen una resistencia de 45,000 ohms cm-1, aunque ésta se reduce a 1,000 ohms cm-1 cuando las palmas de la persona se encuentran sudorosas. (42)

La trayectoria que sigue la corriente a través del cuerpo es el camino más corto entre el punto de entrada y el punto de salida, por lo que la más peligrosa es la que se da a través del pecho ya que puede dañar tanto al corazón como a los pulmones. Esta trayectoria puede suceder cuando el punto de entrada y de salida es cada una de las manos. En definitiva, la cantidad de daño a la persona es proporcional al tiempo que ésta esté en contacto con la corriente eléctrica. (42)

En el caso de los riesgos a la propiedad, se puede dar un incendio o explosión gracias a la electricidad ya sea por un circuito sobrecargado (que transporte una corriente mayor a su capacidad, por lo tanto se liberará calor suficiente para crear un incendio o iniciar una explosión) o por una chispa o arco que libere la energía térmica sobrante, aumentando el riesgo de explosión. Las chispas se pueden dar por un aislamiento roto, por envejecimiento del circuito o por clavijas eléctricas que hacen mal contacto. (42)

## K. Estimación de costos de proyectos:

En algunos casos al contar con un proyecto con una capacidad definida y su respectivo costo, pueden servir de referencia para estimar el costo de inversión de proyectos similares con capacidad distinta. Este cálculo es posible gracias al método de Williams, el cual sirve para obtener una estimación del costo de un proyecto de tamaño T2. Tomando como referencia un proyecto similar con tamaño T1 conocido y costo C1 conocido. (63)

La fórmula es la siguiente:  $C_2 = C_1(T_2/T_1)^f$

Para esta fórmula se tiene conocido C1, T1 y T2. El factor f se puede generalizar a un valor de 0.67, el cual de acuerdo al manual de Perry para el ingeniero químico, logra adaptarse a cualquier tipo de proyecto. (63)

## L. Análisis financiero:

Para poder hacer un análisis adecuado de los flujos de efectivo, los ingresos y costos que se llevan a cabo en un proyecto, es de gran importancia contar con una serie de herramientas básicas para definir la factibilidad financiera del mismo. (16)

**1. Tasa de interés.** En todo proyecto en el que se analizan flujos de efectivo que suceden en distintos momentos, es necesario hacerles un ajuste de su valor a lo largo del tiempo, lo cual se logra con las tasas de interés.

Para este estudio, es necesario saber calcular la tasa de interés efectiva para un período de tiempo menor que la tasa dada. Por ejemplo si se quisiera convertir una tasa anual en tasa mensual, no se divide por 12 la tasa sino que se ingresa a la siguiente fórmula:  $i = (1 + i)^{1/m} - 1$

Donde m es el período en el que se desea subdividir la tasa de interés. (16)

En un proyecto puede haber varias tasas de interés, la TMAR es la tasa mínima atractiva de retorno para el estudio de un proyecto. Esta es definida mediante los riesgos y el potencial que poseen otras inversiones de la organización. En el caso de este estudio, la TMAR corresponderá a un 8% anual, pues representa la tasa de interés a la que se podría obtener ingresos si se deposita el dinero de la inversión en las cuentas de ahorro en un banco local. (16)

La TIR, es la tasa interna de retorno para un proyecto, dada una inversión inicial, el flujo de efectivo del proyecto y la duración del mismo. La TIR puede ser calculada mediante fórmulas de Excel, al tener la inversión inicial, las anualidades y el número de periodos del proyecto mediante la fórmula TASA, en la que se ingresan todos los factores mencionados anteriormente. Para realizar análisis de factibilidad de un proyecto, la  $TIR \geq TMAR$  para que se considere económicamente favorable. (16)

**2. Análisis de valor presente.** Con el fin de determinar la viabilidad económica de un proyecto, resulta muy certero el análisis del valor presente de la operación de un proyecto. Para esto se debe saber la TMAR del proyecto, la inversión inicial y el flujo de efectivo de la operación del mismo. (16)

Para definir mediante el análisis de valor presente si un proyecto es económicamente viable se logra al determinar el valor presente del flujo de efectivo y de la inversión inicial utilizando la TMAR. Si  $VP \geq 0$  en el plazo definido de vida del proyecto, se puede decir que la alternativa es económicamente viable. (16)

## I. JUSTIFICACIÓN

Con el paso del tiempo, el costo de los combustibles fósiles ha ido en aumento. Por otro lado, su uso desmesurado ha desgastado la capa de ozono y contribuido cada vez más al calentamiento global. Desde finales del siglo XX se han desarrollado varias tecnologías que permitan obtener energía de otras fuentes y de manera más amigable con el medio ambiente, ya que los efectos sobre el planeta son sensibles.

La búsqueda de nuevas fuentes de energía ha llegado a los desechos orgánicos. De forma natural, por la acción de bacterias anaerobias, los desechos orgánicos pueden degradarse hasta convertirse en dióxido de carbono, metano y sulfuro de hidrógeno, mezcla conocida como biogás. Por el contenido de metano, este gas puede quemarse y proporcionar energía. Esta reacción, conocida como metanogénesis, ocurre a los desechos orgánicos en cualquier ambiente anerobio, por lo que naturalmente se liberan grandes cantidades de metano a la atmósfera. Sin embargo, el metano contamina aproximadamente 20 veces más que el dióxido de carbono. Por lo que, al atrapar el biogás, éste puede utilizarse como combustible, lo que genera un ahorro económico y se previene que el metano se libere a la atmósfera, teniendo un beneficio ambiental.

Las aguas residuales tienen gran cantidad de materia orgánica, por lo que liberan grandes cantidades de biogás. Este desecho puede convertirse en recurso y fuente de energía, por medio de un Biodigestor, que se encarga de explotar la capacidad de generación de biogás y capturarlo para que pueda ser utilizado como combustible. Al generar biogás se extrae la carga orgánica del agua, lo que reduce la contaminación de la misma y puede ser devuelta a los cauces de agua generando menor contaminación.

En Guatemala, los Biodigestores no son comunes y se desconoce mucho sobre su funcionamiento. Es necesario que se realicen proyectos de investigación al respecto para encontrar los mejores modelos según las características de desechos, clima y materiales disponibles en nuestro país. También es importante investigar y conocer cuáles son las variables que más afectan la digestión anaerobia para poder desarrollar los mejores prototipos.

## IV. OBJETIVOS

### A. General

Generar biogás a partir de aguas servidas por medio de un prototipo de Biodigestor y comparar la producción si se alteran las condiciones del medio.

### B. Específicos

- Diseñar un prototipo funcional, de un sistema de Biodigestor y su recolector de gas.
- Elaborar planos del diseño final y del respectivo recolector.
- Diseñar de forma específica cada elemento del sistema.
- Proporcionar las especificaciones requeridas por los materiales de construcción.
- Fabricar a pequeña escala, modelos de Biodigestores tipo “Batch”, con fines de experimentación.
- Determinar piezas, materiales, partes y equipo necesario para la construcción del prototipo.
- Construir y ensamblar el prototipo.
- Asegurar el correcto funcionamiento del equipo.
- Determinar los requerimientos de mantenimiento del prototipo.
- Establecer un procedimiento estándar de operación.
- Establecer las condiciones y definir la metodología de operación del Biodigestor para promover la seguridad operacional.
- Establecer estándares de calidad para el proceso.
- Seleccionar los sensores de temperatura y presión requeridos para la correcta toma de mediciones en los prototipos de Biodigestores.
- Especificar las variables críticas del proceso y monitorearlas constantemente.
- Determinar el potencial de generación de metano del prototipo, para estimar la proyección del potencial de generación, mediante la utilización de todas las aguas residuales producidas en la Universidad.
- Determinar el potencial y la viabilidad financiera del aprovechamiento de biogás de las aguas residuales de la Universidad del Valle de Guatemala.
- Determinar la influencia de la temperatura y la composición del sustrato en la producción de biogás.

## V. DESARROLLO

### A. Módulo de diseño y desarrollo del prototipo:

Para trabajar el proyecto se siguieron los pasos de diseño a nivel global y posteriormente a nivel específico.

**1. Reconocimiento de la necesidad.** Se necesita un prototipo capaz de generar biogás a partir de aguas servidas, el cual pueda manejar diferentes experimentos con el fin de identificar técnicas apropiadas de biogeneración.

**2. Definición del problema.** Se genera en el área de buses del colegio Americano un constante caudal de aguas servidas. Estas tienen un potencial de generación de biogás adecuado.

Variables de entrada:

- Volumen de desechos
- Temperatura
- Presión en Biodigestores

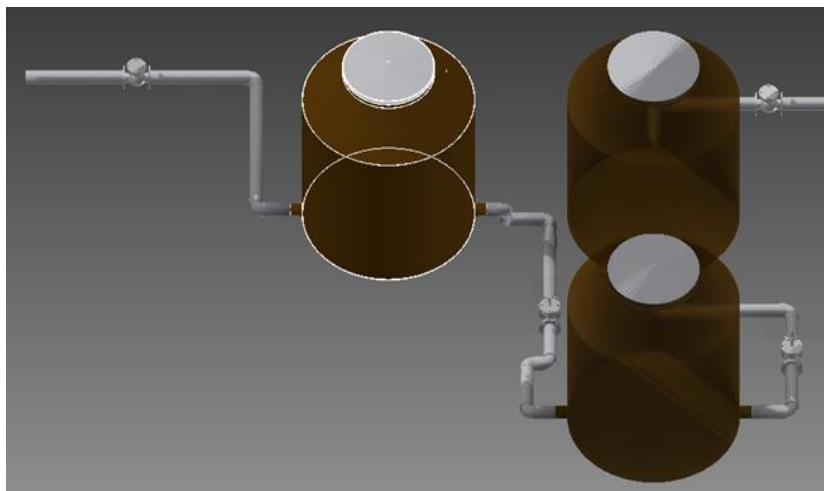
Variables de salida:

- Volumen de biogás
- Presión de biogás
- Volumen de residuos líquidos

### 3. Síntesis.

a. **Primer prototipo.** Consiste en tres tanques de mil litros, se usarán bombas de desplazamiento positivo para llenarlos y se conectará directamente a la fosas del área de buses.

Ilustración 27: Prototipo de tres tanques.



Este diseño pasó a la etapa de análisis y se descartó por varios motivos.

Costos: este diseño requiere cuatro bombas, las cuales tienen costos elevados y no son justificables en un prototipo.

Consumo energético: para el uso de este prototipo se requiere una instalación eléctrica y el consumo puede ser mayor que lo que se pudiese generar.

Mantenimiento: se requiere un mantenimiento minucioso para prevenir problemas con las bombas.

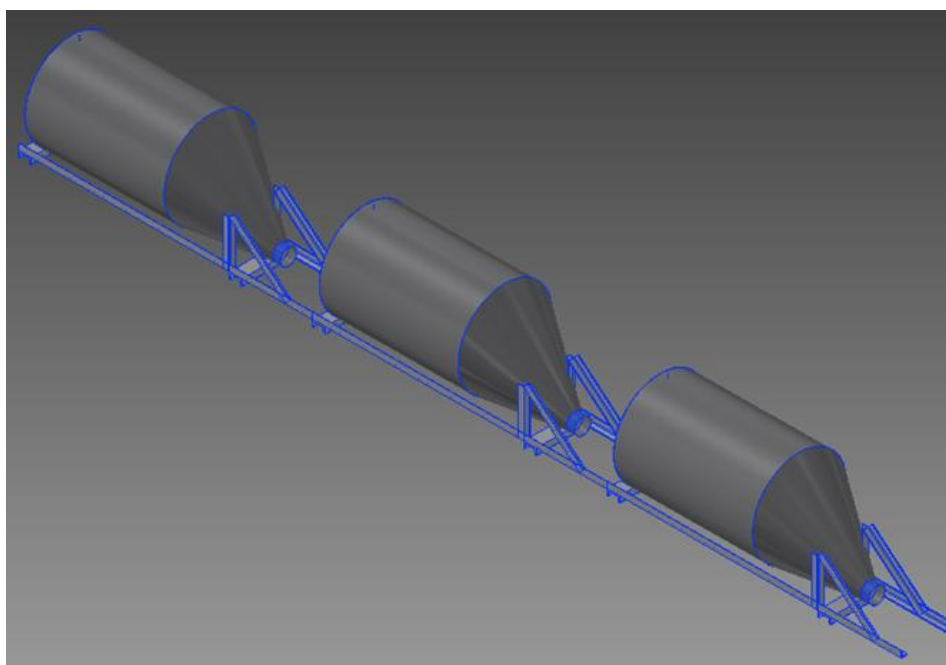
Requerimientos: el caudal de este diseño sobrepasa el que se puede obtener como insumo por parte de la fosa séptica.

Materiales: los polímeros utilizados para los tanques no contemplan altas presiones por lo que las fallas y las fugas eran una problemática.

Esto llevó a la etapa de síntesis para plantear un nuevo diseño.

**b. Segundo prototipo.** Consiste en un digestor en serie con tres etapas una seguida de la otra. El modelo utiliza una pendiente del terreno para fluir sin necesidad de bombas.

Ilustración 28: Sistema de tres Biodigestores en serie.



Al pasar este modelo a la fase de síntesis se encontraron varias desventajas por lo que no se aceptó. Las causas fueron las siguientes.

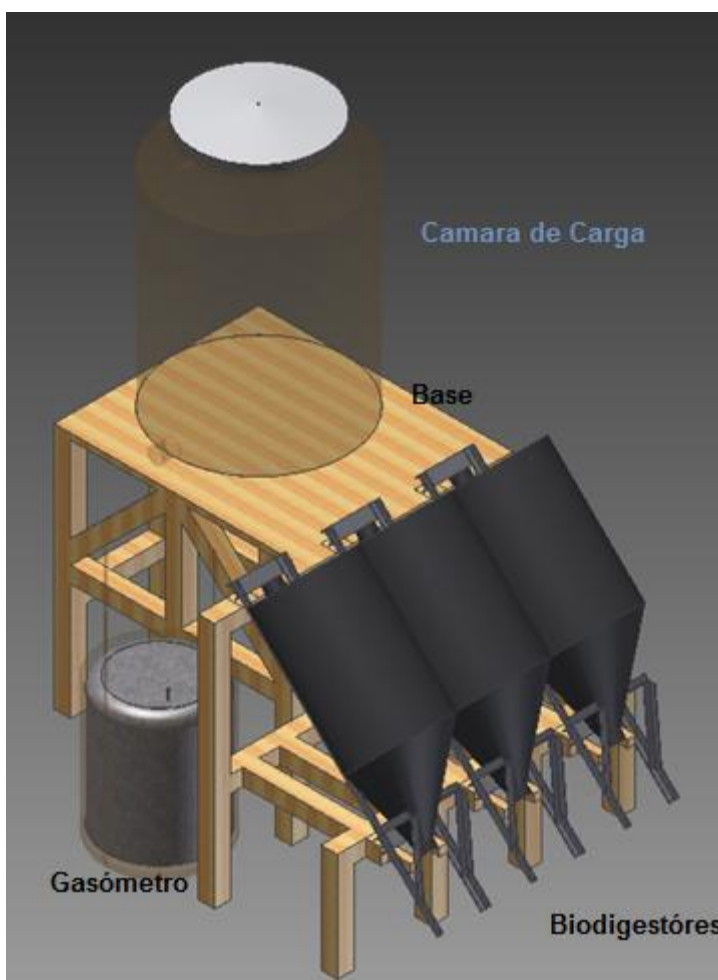
Objetivos: se determinó que este diseño optimizaría el tratamiento de aguas servidas, pero la producción de biogás sería muy baja ya que únicamente el primer Biodigestor generaría metano de manera adecuada.

Requerimientos: este diseño requiere una pendiente natural de 45 grados, lo que hace que la zona de descarga quede inaccesible y conlleva riesgos de seguridad para su operación.

**c. Tercer prototipo.** Consiste en una base de madera la cual soporta todo el sistema que incluye el tanque de abastecimiento, los Biodigestores, su tubería de gas y de líquidos.

Al analizar este diseño se determinó que cumple con todas las necesidades definidas en la etapa de definición del problema, por lo que se procede, usando como herramienta principios físicos y matemáticos de la ingeniería a comprobarlo.

**Ilustración 29: Sistema de tres Biodigestores con cámara de carga.**



Se procede a dividir el prototipo en pequeños fragmentos para estudiar a fondo que cumplan con las necesidades específicas de cada uno. El sistema se dividió de la siguiente manera:

- Base de madera: soporta toda la estructura y la acomoda de forma eficiente y funcional.
- Cámara de carga: es donde se llena la materia que posteriormente pasará a los Biodigestores.
- Biodigestores: son cámaras anaeróbicas capaces de soportar la presión generada de biogás.
- Gasómetro: dispositivo de almacenamiento de biogás producido.
- Tubería de carga: el sistema de tubería y accesorios necesarios para cargar los Biodigestores.

- Tubería de gas: sistema de mangueras que conducen el biogás al Biodigestor.

Se procede a aplicar los pasos del diseño de forma individual.

### Diseño base de madera

- Identificación de la necesidad: Se requiere una base capaz de acomodar todo el sistema de biodigestión de forma segura y útil.
- Definición del problema: Es necesario contar con una estructura que soporte el peso de una cámara de carga de 1,100 litros, tres digestores cargados con 196 litros cada uno y las instalaciones de tubería y mangueras.

Variable de entrada:

- Cargas distribuidas de tres digestores y de una cámara de carga.

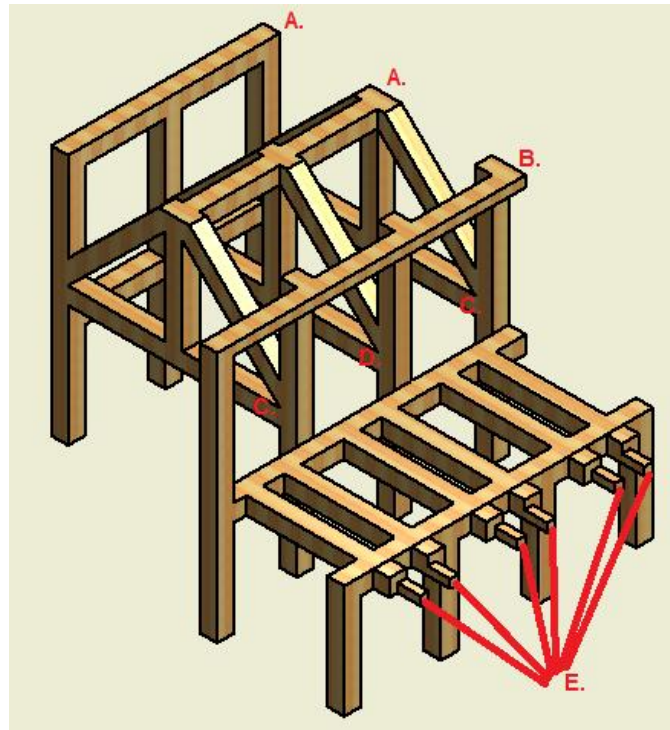
	Peso (N)
Biodigestor	195.83
Carga de 220 lts	2,158.47
<b>Total</b>	<b>2,354.30</b>
	Peso (N)
Carga de 1100 lts	10,780.00
<b>Total Sistema</b>	<b>13,134.30</b>

Variable de salida:

- Esfuerzo último del diseño.
- Síntesis: Se creó un modelo de la estructura y sus dimensiones (ver plano).
- Análisis y optimización: Se analizó la estructura por comportamiento de vigas y columnas.

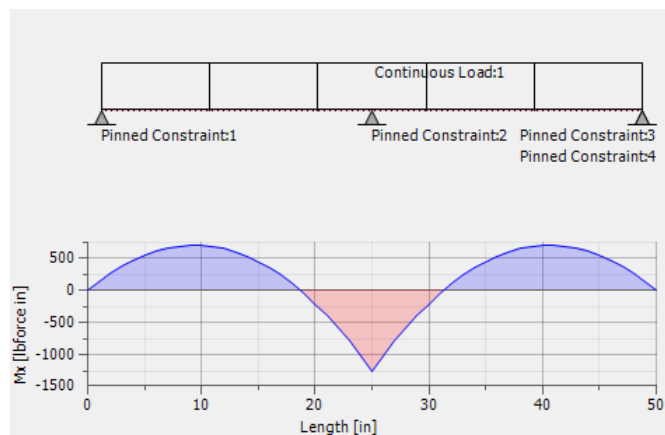
**a. Vigas:** por su geometría y sus cargas se determinó que las doce vigas que se tienen se pueden agrupar en cinco categorías.

Ilustración 30: Diagrama de clasificación de vigas



Podemos observar el comportamiento de los momentos causados por las cargas estáticas del sistema.

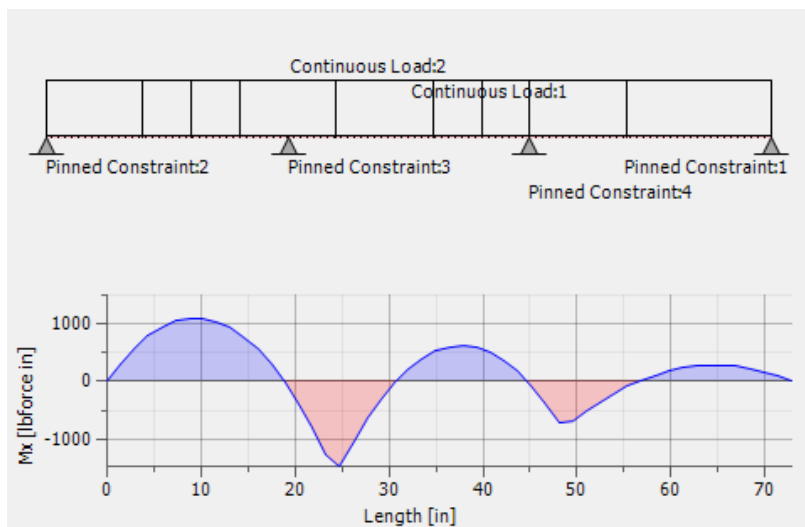
Ilustración 31: Diagrama de momento en vigas superiores.



Viga tipo a.

Este tipo de viga cuenta con tres apoyos aticulados y una carga distribuida, el momento máximo se localiza a la mitad, sobre el segundo soporte.

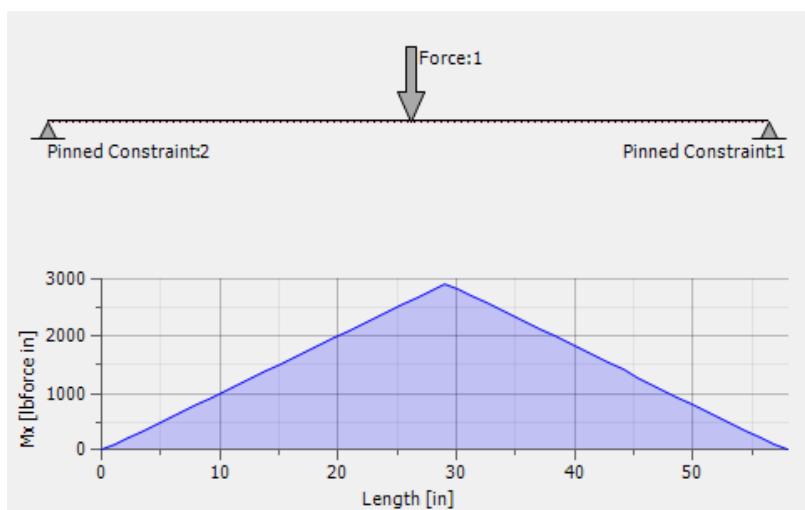
**Ilustración 32: Diagrama de momento en viga superior de soporte de biorreactores.**



**Viga tipo b.**

Esta viga es de las que más cargas soporta, ya que sobre ella se localizan cargas tanto de la cámara de carga como de los tres digestores.

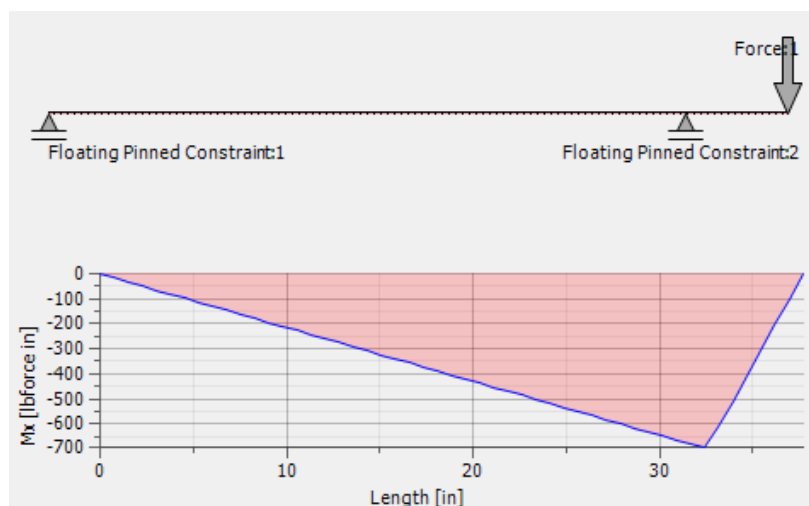
**Ilustración 33: Diagrama de momento en vigas medias.**



**Viga tipo c y d**

Estas vigas se localizan en la parte media de la estructura. Estas soportan una columna en la parte media, lo que se interpreta como una fuerza puntual.

**Ilustración 34: Diagrama de momento en vigas medias de soporte de los biorreactores.**



**Viga tipo e.**

Las vigas tipo “e” son aquellas que soportan la parte inferior de los digestores. Cuentan con dos apoyos y la carga se localiza en un extremo.

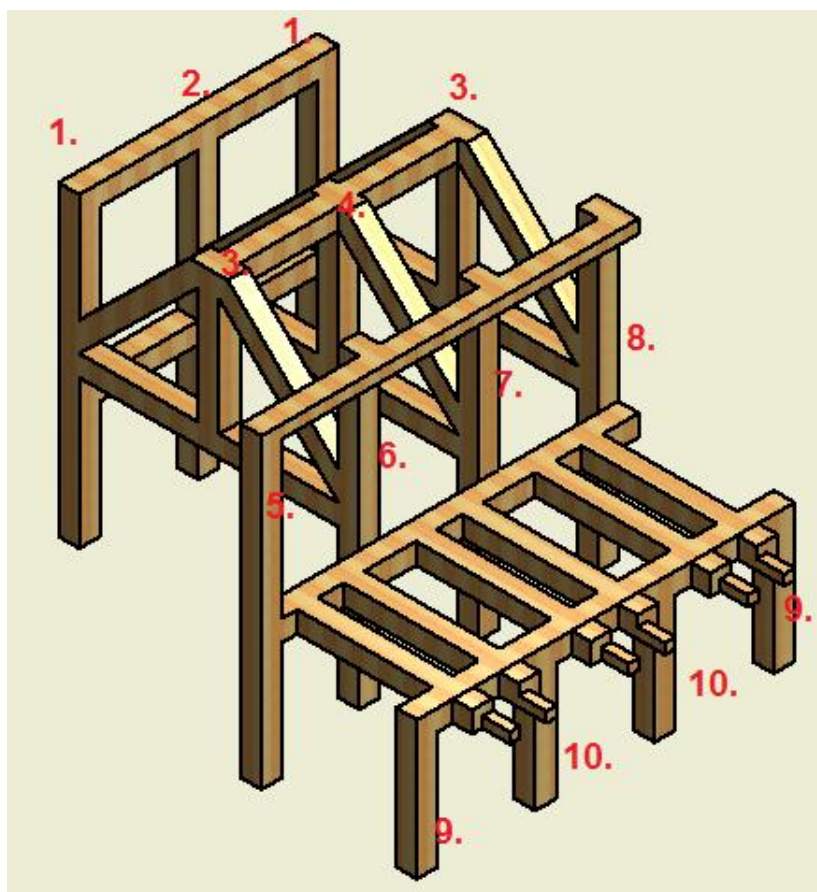
**Tabla 15: Cálculo de esfuerzos últimos para vigas.**

		Aristas														
Tipo	Cantidad	a (m)	b (m)	Area (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	Largo L (m)	Corte max V (N)	Esfuerzo Cortante (Mpa)	R0 (N)	R1 (N)	R2 (N)	R3 (N)	M max (Nm)	Esfuerzo Flexionante (Mpa)	Esfuerzo Cortante horizontal (Mpa)	
A.	2	0.1016	0.1016	0.0103	8.880E-06	1.27	1,796.66	1.741E-01	N/A	898.33	1,796.66	898.33	142.61	0.82	0.26	
B.	1	0.1016	0.1016	0.0103	8.880E-06	1.85	2,733.54	2.648E-01	468.44	1,835.21	2,733.54	1,366.77	165.30	0.95	0.40	
C.	2	0.1016	0.1016	0.0103	8.880E-06	1.473	1,796.66	1.74E-01	N/A	898.33	1,796.66	898.33	657.78	3.76	0.26	
D.	1	0.1016	0.1016	0.0103	8.880E-06	1.473	898.33	8.70E-02	N/A	449.17	898.33	449.17	328.89	1.88	0.13	
E.	6	0.1016	0.1016	0.0103	8.880E-06	0.957	708.71	6.87E-02	601.56	708.71	107.15	N/A	696.04	3.98	0.10	
<b>Maximos</b>								<b>2.65E-01</b>						<b>3.98</b>	<b>0.40</b>	

Se puede observar que el esfuerzo máximo se dará por flexión y deja prácticamente despreciable el esfuerzo de corte tanto a lo largo como el horizontal.

**b. Columnas:** Al igual que con las vigas, se clasificaron las columnas por su geometría y sus cargas. En total se cuenta con 14 y se agruparon en 10 tipos. A éstas se les calculó esfuerzos de pandeo y compresión.

Ilustración 35: Diagrama de clasificación de columnas.



A continuación se determinan las propiedades geométricas por grupo de columna, para determinar los esfuerzos que actúan sobre esta.

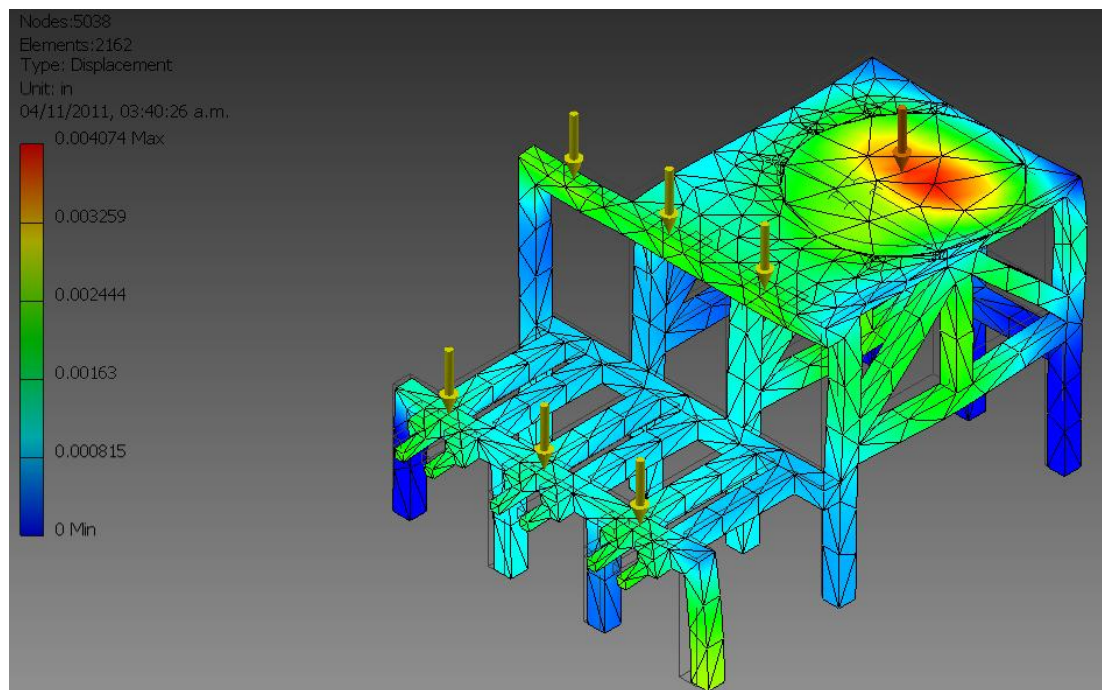
Tabla 16: Cálculo de esfuerzos últimos para columnas.

		Aristas													
Tipo	Cantidad	a (m)	b (m)	Area (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	Largo L (m)	E Modulo de Young (GPa)	P1 (N)	P2 (N)	P3 (N)	Pt (N)	Flexiones	Pcr (N)	Factor Seguridad	
1.	2	0.1016	0.1016	0.0103	8.880E-06	1.5	1.00	898.33	449.17	N/A	1,347.50	2	155,801.20	115.62	
2.	1	0.1016	0.1016	0.0103	8.880E-06	1.5	1.00	1,796.66	898.3	N/A	2,694.96	2	155,801.20	57.81	
3.	2	0.1016	0.1016	0.0103	8.880E-06	0.675	1.00	898.33	N/A	N/A	898.33	1	192,347.16	214.12	
4.	1	0.1016	0.1016	0.0103	8.880E-06	0.675	1.00	1,796.66	N/A	N/A	1,796.66	1	192,347.16	107.06	
5.	1	0.1016	0.1016	0.0103	8.880E-06	1.5	1.00	468.44	N/A	-107.00	361.44	1	38,950.30	107.76	
6.	1	0.1016	0.1016	0.0103	8.880E-06	1.5	1.00	1,835.21	449.17	-214.00	2,070.38	2	155,801.20	75.25	
7.	1	0.1016	0.1016	0.0103	8.880E-06	1.5	1.00	2,733.54	898.3	-214.00	3,417.84	2	155,801.20	45.58	
8.	1	0.1016	0.1016	0.0103	8.880E-06	1.5	1.00	1366.77	449.17	-107.00	1,708.94	2	155,801.20	91.17	
9.	2	0.1016	0.1016	0.0103	8.880E-06	0.674	1.00	N/A	N/A	708.71	708.71	1	192,918.35	272.21	
10.	2	0.1016	0.1016	0.0103	8.880E-06	0.674	1.00	N/A	N/A	1,417.42	1,417.42	1	192,918.35	136.11	
														<b>45.58</b>	

Nuevamente podemos observar que el diseño fallará por flexión antes que por pandeo, corte, compresión o tensión.

- Evaluación: Luego de estos cálculos se sometió el modelo a pruebas virtuales de elementos finitos con el fin de corroborar los resultados.

**Ilustración 36: Test de elementos finitos, de cargas sobre la estructura.**



Como se muestra en la imagen anterior, se obtuvo una deformación máxima de 0.0041 in, valor aceptable para materiales como la madera.

- Presentación: Por medio de planos de construcción se presenta el modelo para que pase a la etapa de fabricación. (ver planos adjuntos)

#### **4. Diseño cámara de carga:**

- Identificación de una necesidad: Se necesita tener disponibilidad de desechos orgánicos para alimentar los Biodigestores.
- Definición del problema: Existen tres Biodigestores de 200lts que deben llenarse de forma eficiente. Para la cámara de carga su variable de entrada y salida será el volumen. Puesto que el caudal de llenado y el método usado pueden variar se debe tener un sistema de entrada versátil

que pueda acoplarse a varios métodos de llenado. Mientras que el volumen de salida tiene que ser regulable ya que éste es de interés para los Biodigestores.

- Síntesis: Se determina que existen varios proveedores de fosas sépticas y tanques de agua, los cuales se adecúan perfectamente al sistema. Se sabe que el volumen sumado de los Biodigestores es de aproximadamente 600lts por lo que se escoge un tanque de 1,000 litros para tener en caso de necesidad muestras de materia sin fermentar.
- Análisis y optimización: Se debe adecuar una llave de mayor diámetro a la salida del líquido ya que ésta originalmente fue diseñada para agua potable.
- Presentación: Se presenta los requerimientos para que se compre el tanque.

## 5. Diseño Biodigestor

- Identificación de una necesidad: Se necesita un dispositivo capaz de brindar condiciones adecuadas para la generación de biogás.
- Definición del problema: Para la generación de biogás se necesita un ambiente anaeróbico capaz de soportar presiones mayores a la atmosférica, y por el enfoque del proyecto se requiere que a su vez sean versátiles para la experimentación.

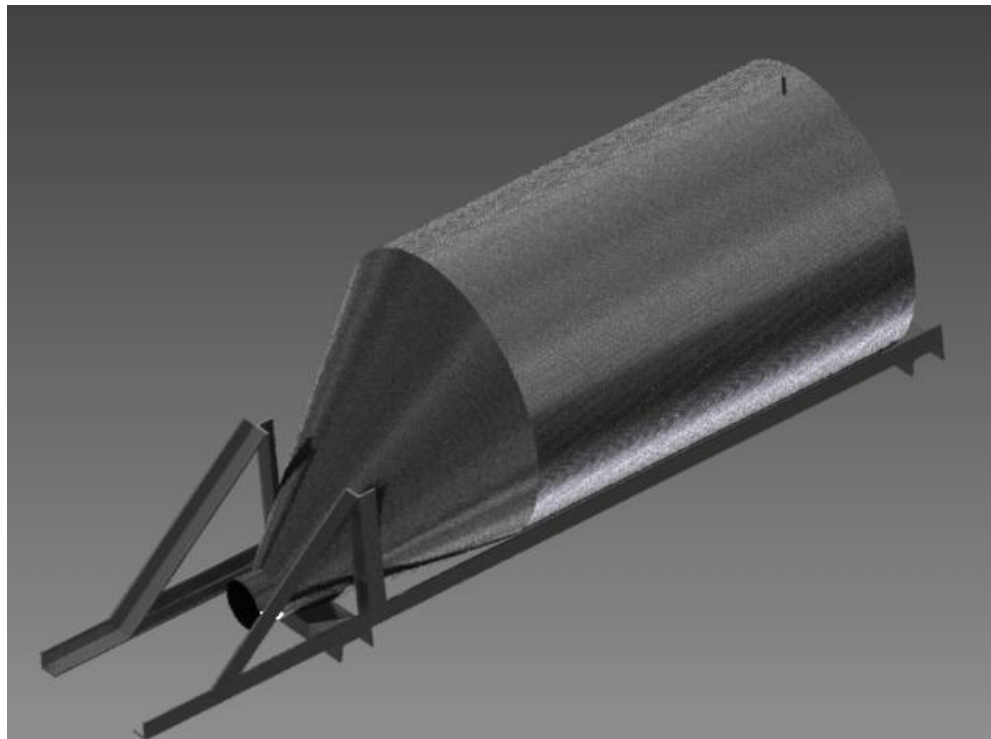
Variables de entrada

- Volumen de líquidos, 220 litros por Biodigestor
- Presión de 30psi (según módulo de química se esperan 10psi máximo por lo que se considera un factor de seguridad de 3)
- Otros ( Estos varían según el experimento realizado)

#### Variables de salida

- Volumen de biogás (para medir éste se usa el gasómetro)
  - Esfuerzos estructurales
  - Volumen de salida
- 
- Síntesis: Se debe determinar los esfuerzos críticos de los Biodigestores a partir de la presión interna y se tiene que tomar en cuenta que debe poder tener 220 litros de materia.

**Ilustración 37: Biodigestor anaeróbico.**



- Análisis y optimización: Se calculan los esfuerzos críticos para validar el diseño.

Tabla 17: Esfuerzos internos en cilindros presurizados.

<b>Tonel</b>			
di (m)	5.73E-01	p	presión interna sobre pared de cilindro
t (m)	1.17E-03	di	diámetro interior cilindro
P diseño (Pa)	2.07E+05	t	grosor
<b>σ tangencial (Pa)</b>	<b>5.08E+07</b>	σt	esfuerzo tangencial
<b>σ longitudinal (Pa)</b>	<b>2.53E+07</b>	σL	esfuerzo longitudinal
$(\sigma_t)_{\max} = \frac{p(d_i + t)}{2t} \qquad \sigma_l = \frac{pd_i}{4t}$			

Ecuación 24: Esfuerzos internos en cilindros presurizados.

Tabla 18: Esfuerzos internos en conos presurizados.

<b>Cono</b>		p	presión interna sobre pared de cilindro
r (m)	2.88E-01	r	radio máximo del cono
t (m)	2.36E-03	t	grosor
α (°)	34.11	σt	esfuerzo tangencial
P diseño (Pa)	2.07E+05	σL	esfuerzo longitudinal
<b>σ tangencial (Pa)</b>	<b>3.04E+07</b>	α	medio ángulo del ápice
<b>σ longitudinal (Pa)</b>	<b>1.52E+07</b>		
$\sigma_L = \frac{P * R}{2t \cos \alpha} \qquad \sigma_t = P R / t \cos \alpha$			

Ecuación 25: Esfuerzos internos en conos presurizados.

Tabla 19: Esfuerzos en roscas.

<b>Roscas</b>	<b>2" de diámetro</b>	<b>3/4" de diámetro</b>
P diseño (Pa)	2.07E+05	2.07E+05
Área a presión (m <sup>2</sup> )	2.03E-03	2.84E-04
Fuerza máxima (N)	419.24	57.8269
Área a tensión (m <sup>2</sup> )	9.74E-04	2.13E-04
<b>σ fluencia (Pa)</b>	<b>4.30E+05</b>	<b>2.74E+05</b>

- Presentación: Se presentan los planos de construcción y ensamble de los Biodigestores. (ver planos adjuntos)

## 6. Diseño del gasómetro

- Identificación de una necesidad: Se requiere almacenar el gas producido por los digestores.
- Definición del problema: Se tienen tres Biodigestores funcionando bajo diferentes condiciones, se espera que la producción de biogás sea distinta por lo que el gasómetro tiene que ser capaz de medir el volumen producido por individual.

Variable de entrada

Caudal de biogás presurizado.

Variable de salida

Volumen de biogás medible por un cambio de altura.

- Síntesis: Se tiene que dar lineamientos para la construcción del gasómetro, no se puede especificar todo por limitantes en los materiales.
- Análisis y optimización: Se determinó que el gasómetro debía tener la capacidad de almacenar por lo menos 55 litros de biogás, que es lo necesario para almacenar dos días de producción máxima. Para calcular esto se utilizó la producción máxima obtenida con los prototipos pequeños, lo cual se muestra en la tabla siguiente.

**Tabla 20: Producción de biogás en prototipos pequeños.**

Volumen 3.78 L	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	PROMEDIO
<b>Prototipo 1</b>	72 mL	76 mL	78 mL	81 mL	72 mL	76 mL
<b>Prototipo 2</b>	303 mL	217 mL	246 mL	220 mL	234 mL	244 mL
<b>Prototipo 3</b>	68 mL	72 mL	81 mL	77 mL	85 mL	77 mL

La producción máxima fue de 303 mililitros, en botes de 3.78 litros llenados al 75% de su capacidad. Conociendo que en el prototipo, el volumen será de 262 litros llenados al 75% de su capacidad, fue sencillo obtener un estimado de generación diaria máxima de biogás. Esto se estimó con una ecuación de proporcionalidad:

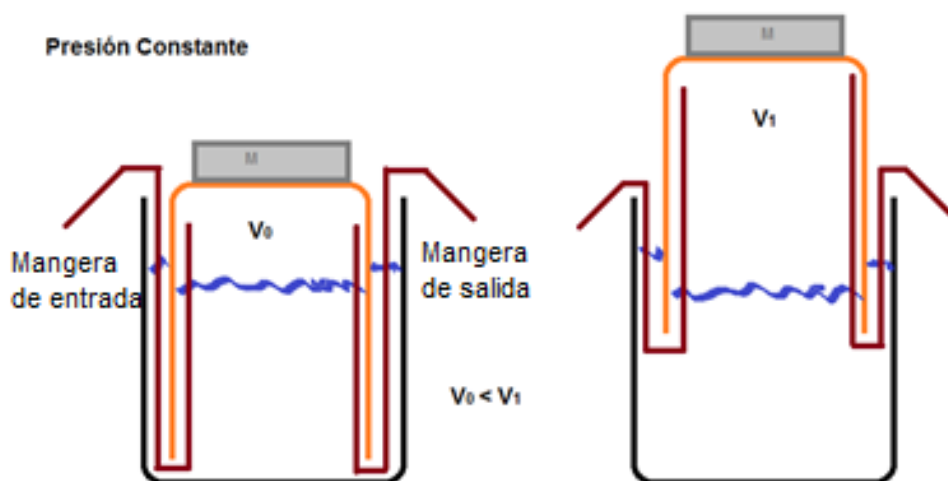
$$\frac{0.303 \text{ L}}{3.78 \text{ L} * 75\%} = \frac{\text{Volumen máximo diario en prototipo}}{262 \text{ L} * 75\%}$$

$$\text{Volumen máximo diario en prototipo} = \frac{0.303 * 262}{3.78} = 21 \text{ litros/día}$$

El tiempo máximo que estará el prototipo generando sin liberar su presión, será de dos días, por lo que el gasómetro debe tener una capacidad de 42 litros. Se le atribuyó un 30% de variación debido a que en las muestras obtenidas, se tuvo una variación máxima con el valor de este porcentaje (las mediciones más alejadas fueron 303 mililitros y 217 mililitros, lo cual es una variación un poco mayor al 28%). Por lo tanto, 42 litros agregándole un 30% de variación, es un volumen de almacenaje de 55 litros como mínimo.

- **Presentación:** Se presenta planos con especificaciones básicas. Y se muestra un diagrama del funcionamiento.

Ilustración 38. Diagrama de funcionamiento del gasómetro.

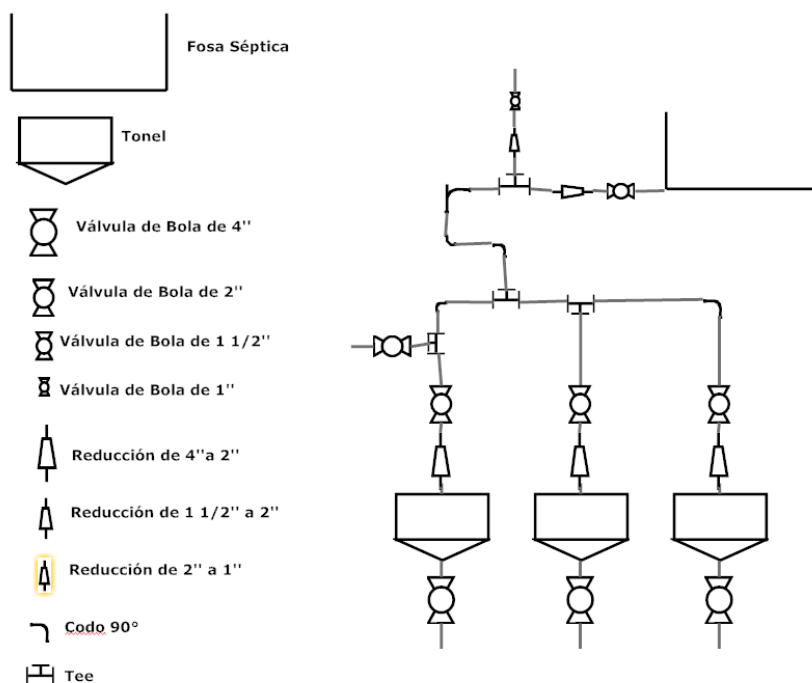


El gasómetro funciona a presión constante, es un sistema de cilindro émbolo en el cual por medio de un sello de agua se le ingresa o extrae biogás. Al tener una presión constante lo que va a variar es el volumen de la cámara de gas.

## 7. Diseño de la tubería

- Identificación de una necesidad: Se requiere mover un caudal líquido de la cámara de carga a los Biodigestores.
- Definición del problema: Se tiene que poder controlar la forma en que se llenan los Biodigestores. Tiene que ser seguro y de fácil utilización.
- Síntesis: Se usará una tubería única para el llenado de los tres Biodigestores. De ésta se dividirán tuberías individuales para cada uno. Por medio de válvulas se podrá controlar el orden y la forma de llenado.

**Ilustración 39: Diagrama de tubería de líquidos.**



- Análisis y optimización:** Se calculan las pérdidas para un caudal deseado y se determina el tiempo promedio de llenado para cada Biodigestor. El diseño cuenta con una válvula auxiliar para vaciar la cañería una vez ésta haya sido utilizada. Lo anterior se debe realizar ya que la materia que quedase en la tubería puede generar biogás y eso nos crea presión que puede provocar fallas.

**Tabla 21: Propiedades y coeficientes de pérdida del sistema de tuberías.**

Propiedades del sistema	
Presión inicial (Pa)	0
Presión final (Pa)	1378
Velocidad inicial (m/s)	0
Altura inicial (m)	1.38
Altura final (m)	0
Distancia (m)	0.0508
Viscosidad	1.51E-05

Coeficientes de Pérdida	
Codo	0.9
Tee Recto	0.4
Tee Lateral	1.8
Válvula de bola	0.2
Expansión	0.87
Reducción	0.55

Tabla 22: cálculo de caudal, pérdidas y tiempo de llenado.

Sistema	L (m)	Codos	Accesorios del Sistema					Re	f	Vf (m/s)	Pérdida L (m)	Pérdida Accesorios (m)	Pérdida Total (m)	V Salida (m/s)	Q Sal (m <sup>3</sup> /s)	t llenado (min)
			Tee Recto	Tee lateral	Válvula	Expansión	Reducción									
1	2.148	4	1	1	2	1	1	5,188	0.038	1.54	0.19	0.92	1.12	1.54	0.0031	1.40
2	2.978	2	1	2	2	1	1	5,037	0.038	1.50	0.25	0.87	1.13	1.50	0.0030	1.44
3	3.808	4	2	1	2	1	1	4,801	0.039	1.43	0.30	0.83	1.14	1.43	0.0029	1.51

Re = Número de Reynolds

f = Factor de fricción (obtenido por medio del diagrama de Moody)

Para encontrar la velocidad final  $V_f$  de primero se calculó ésta sin pérdidas, ya que para averiguarlas se requiere el número de Reynolds y para obtener éste último, se requiere conocer la velocidad. Con la velocidad calculada se encuentra la pérdida de presión en la tubería y se calcula el número de Reynolds utilizando el diagrama de Moody. Por último, se vuelve a calcular la velocidad final tomando en cuenta las pérdidas.

Puesto que cada Biodigestor se llena por separado, se modela el sistema como tres diferentes tuberías con distintos accesorios y largos.

Podemos ver que dos pulgadas es el diámetro necesario para el funcionamiento deseado del sistema de tuberías.

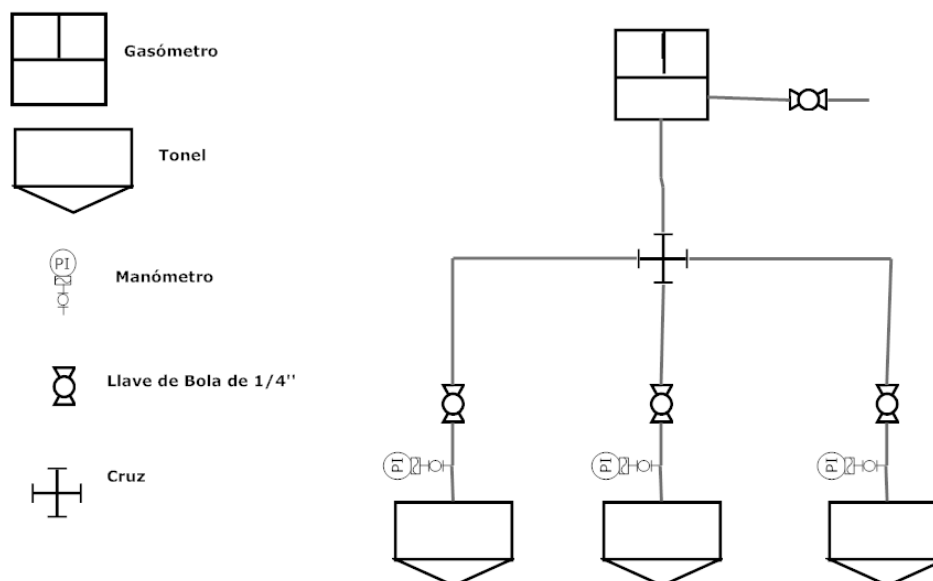
- Presentación: Se usa el diagrama como instructivo de instalación de tuberías.

## 8. Diseño tubería de gas

- Identificación de una necesidad: Se necesita poder transportar un caudal de biogás de los Biodigestores al gasómetro.
- Definición del problema: Se tienen tres Biodigestores presurizados con diferentes presiones y hay que extraer el gas de ellos.
- Síntesis: Para que se dé el flujo de gas se aprovecha el diferencial de presión que existe entre los Biodigestores y el gasómetro el cual se encuentra a una presión constante y muy cercana a la atmosférica. El punto crítico para este diseño es únicamente que las tuberías

sean capaces de soportar la presión del Biodigestor, más un factor de seguridad. Por lo que se recomienda que las mangueras que se usen sean capaces de soportar 30 psi o más.

**Ilustración 40: Diagrama de tubería de gas**



- **Presentación:** Se usa el diagrama como instructivo de instalación de tubería.

**9. Análisis y optimización.** Para que todo el sistema sea montado lo primero a construir es la base general, se tendrá que examinar el lugar en donde se instalará.

Lo siguiente a construir serán los Biodigestores, en paralelo se puede trabajar en el gasómetro y la adquisición de la cámara de carga.

Cuando se tenga todo montado será el momento de instalar el sistema de tuberías de carga y las mangueras de transporte de biogás.

**10. Evaluación.** Se examina el prototipo como un todo y su principal factor de evaluación será la producción de biogás. Individualmente se puede examinar cada elemento para determinar si está trabajando según los requerimientos y encontrar posibles fallas que se puedan resolver. Para mayor detalle de este punto se tendrá que examinar los resultados de la fase de implementación del prototipo.

## B. Módulo de fabricación, instalación y mantenimiento del prototipo:

### 1. Fabricación e instalación

#### a. Pequeños prototipos tipo “Batch”

##### ▪ Objetivo:

Medir temperatura, pH, y volumen de biogás generado de una muestra de sólidos tomada de la fosa séptica a utilizar en el prototipo mayor para, de esta manera, dimensionarlo.

##### ▪ Materiales utilizados:

###### *Etapas de fabricación*

- 3 contenedores plásticos de 1 galón (3.78 litros)
- 25 mililitros de pegamento PVC
- 6 parches de llanta
- 1 rollo de cinta de aislar
- 1 libra de bicarbonato de sodio
- 3 jeringas
- Barreno
- 1 yarda de manguera de vinyl transparente de 7.65 mm x 1 mm de grosor

###### *Etapas de llenado*

- Balde
- Lazo
- Embudo
- Vara larga de mínimo 1 metro y rígida
- Equipo de protección personal (bata, guantes de hule, lentes, zapato industrial, mascarilla)

### *Etapa de implementación*

- 3 probetas
- 3 baldes
- 1 libra de alambre de amarre
- Termómetro láser

### ▪ Metodología

#### *Etapa de fabricación*

- Se forraron los contenedores plásticos con cinta de aislar.
- Se colocaron dos parches para llanta en la parte inferior (uno sobre el otro como se muestra en la Ilustración 41).

**Ilustración 41: Contenedor de 3.78 litros forrado y con parche**



- Se vertió bicarbonato de sodio con agua en el recipiente y se cerró rápidamente.
- Al estar presurizado se tomaron muestras con jeringa para verificar que el parche funcionara.
- Se liberó la presión y el contenido de bicarbonato de sodio con agua.
- Se perforaron las tapaderas con barreno y se le adjuntaron las mangueras con silicón.

### *Llenado*

- Se abrió la fosa séptica removiendo la plancha de cemento que la cubre y la tapa.
- Se amarró el lazo a la manija de la cubeta.
- Utilizando la vara rígida, se sumergió la cubeta en la fosa, sosteniendo el lazo.
- Con el lazo se sacó la cubeta con material de la fosa séptica y se vertió el contenido en los contenedores utilizando el embudo. Se llenaron a un 75% de su altura, al tanteo.

**Ilustración 42: Llenado de prototipos**



**Ilustración 43: Equipo de protección**



- Se colocaron prototipos en un lugar seguro con la debida señalización.

**Ilustración 44. Prototipos colocados generando biogás**



- Se reubicaron prototipos cerca del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

#### *Implementación*

- Se llenó la cubeta con agua.
- Se colocó la probeta en posición invertida (al revés) dentro de la cubeta, asegurándose de que estuviera llena de agua.
- Para asegurar la probeta se utilizó el alambre.
- Se colocó la manguera adaptada a las tapaderas de los contenedores, dentro de la probeta.

**Ilustración 45. Prototipo acoplado a probeta**



- Justificación y cálculos

El objetivo de la cinta de aislar es que los prototipos absorban calor del sol para que se mantengan a una temperatura mayor a la ambiental.

El parche de llanta fue colocado para lograr medir pH. Esto se hace insertando una jeringa para sacar una muestra de la sustancia, el parche al sacar la jeringa se cierra tapando el agujero. La muestra obtenida con la jeringa se coloca sobre un papel medidor y así se obtiene su pH.

El termómetro láser se utiliza para medir la temperatura de los prototipos.

El bicarbonato de sodio es para probar que los prototipos sean funcionales y no se les escape la presión. Ya que la reacción del mismo con libera  $\text{CO}_2$  provocando efervescencia. Se evaluó el funcionamiento del prototipo en estas condiciones. Se insertaron las jeringas sobre el parche para asegurarse de que cumpliera su función.

El llenado se efectuó con los sólidos de la fosa séptica del área de buses del Colegio Americano, debido a que ésta era más apta para el estudio que la de la Universidad por su ubicación, dimensiones y uso. Se tuvo toda la colaboración y ayuda de los pilotos de buses en este proceso.

Las probetas dentro de agua con la manguera adaptada a los contenedores se utilizaron para medir el volumen de gas generado, ya que éste desplazaría el agua en la probeta. La toma de medición fue sencilla debido a que la probeta ya posee una escala de medición de volumen.

Inicialmente se pensaba medir presión para obtener el volumen, por medio de un cálculo de gases ideales. Esto se iba a hacer adaptando válvulas de llanta de automóvil a la tapadera de los recipientes, en lugar de la manguera. Con un manómetro para llanta de carro se pensaba medir la presión. Se tuvo el inconveniente de que el manómetro de llanta de carro tenía una escala muy grande para medir la presión tan relativamente pequeña que generaba el biogás en los recipientes.

**Ilustración 46: Válvula de llanta de automóvil adaptada a tapadera**



Se consideró la fabricación de un tubo Pitot pero debido a la presión que se quería medir (entre 0 y 5 psi), se descubrió que la altura de agua equivalente a 5 psi era aproximadamente de 3.5 metros, por lo que fabricar uno con el fin de medir presión de un pequeño prototipo no se consideró viable debido al consumo de recursos y tiempo. Se tomó este valor de presión (5 psi) como referencia ya que se observó en las mediciones que el dato mayor obtenido de presión era muy cercano a esta cifra, por lo que era adecuado hacer una escala más pequeña de este rango de presiones.

El cálculo de la altura se hizo de la siguiente manera:

$$g \text{ (gravedad)} = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\rho \text{ (densidad del agua)} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$P \text{ (presión)} = 5 \text{ psi}$$

$$1 \text{ Pa} = 0.000145 \text{ psi}$$

$$P = 5\text{psi} * \frac{1 \text{ Pa}}{0.000145 \text{ psi}} = 34482.76 \text{ Pa}$$

$$P = \rho * g * h$$

$$h = \frac{P}{\rho * g} = \frac{34482.76}{1000 * 9.81} = 3.52 \text{ m}$$

El valor obtenido  $h$ , es la altura de agua (en metros) equivalente a 5 psi de presión.

Ya que el fin de medir presión era tener un dato para calcular volumen, se decidió proceder a medir directamente el volumen para evitar complicaciones y así tener mediciones más exactas debido a que serían directas de la muestra. Por esto se tomó la decisión de utilizar probetas dentro de agua e insertarles la manguera adaptada a los contenedores.

## 2. Cámaras de digestión

- Objetivo

Fabricar contenedores herméticos para que la materia se fermente. Debe de permitir el ingreso y extracción de materia sin comprometer la hermeticidad. También debe permitir la extracción de biogás generado.

- **Materiales**
  - 3 depósitos (toneles) de 55 galones de acero AISI 1008 ( $\sigma = 41500$  psi)
  - Plano de fabricación (Contenido en módulo de diseño)
  - 1 Adaptador hembra PVC de 4" como muestra.
  - 3 galones de pintura anticorrosiva
  - 2 litros de "thinner" o diluyente de pintura
  - Compresor con pistola de atomizado para pintura
  
- **Metodología**
  - Se contactó una empresa dedicada al maquinado y fabricación de piezas.
  - Se presentó y explicó, al encargado de la empresa, el plano de fabricación con las especificaciones que se requería que tuvieran las piezas (herméticas y demás).
  - Se obtuvieron toneles vacíos de aceite de 55 galones (208 litros).
  - Se transportaron toneles al taller de fabricación y se proporcionó el adaptador hembra como muestra para la rosca.
  - Se llevó un control del avance de la fabricación.

**Ilustración 47: Proceso de fabricación de tonel con cono excéntrico a. Tonel sin tapa inferior b. Agujero de rosca trasero c. Acople macho con rosca d. Cono excéntrico e. Cono soldado a tonel**



- Una vez el fabricante concluyó las modificaciones a los toneles y la construcción de las estructuras de angulares, se acordó la fecha de entrega en la que fuera posible recibirlos.
- Los toneles con sus respectivas estructuras fueron entregados en el taller de Metal Mecánica de la Universidad del Valle de Guatemala.

**Ilustración 48: Toneles modificados con su respectiva estructura de angular**



- Se trasladaron los toneles hacia el área de pintado.
- Se hizo la mezcla de pintura con “thinner” al tanteo hasta que se consideró que estaba suficientemente diluida.
- Se vertió la mezcla en el contenedor de la pistola del compresor.
- Se removió la tapa de 2”, de cada tonel y se insertó la boquilla de la pistola a través del agujero para pintar.

**Ilustración 49: Tapas de tonel**



- Se esperó a que secase la capa de pintura.
- Se aplicaron 5 capas más de pintura.
- Se retornaron los toneles al taller de la Universidad.

▪ Justificación y cálculos

La cámara de digestión consiste en tres toneles de 55 galones (208 litros) con un cono excéntrico rolado para evitar estancamiento de sólidos. Según software de diseño, el volumen que agrega este cono excéntrico al tonel de aceite es de 54 litros, por lo tanto:

$$V \text{ cámara de digestión} = 208 + 54 = 262 \text{ litros}$$

Sin embargo, ha sido especificado que se debe llenar aproximadamente a un 75% de su capacidad para dar espacio a la generación de biogás. Ya que se tienen tres fases de 262 litros, llenos a 75%, se obtiene un aproximado:

$$V \text{ ocupación de sólidos total} = 262 * 3 * 0.75 = 589.5 \text{ litros}$$

Los toneles con su cono excéntrico soldado fueron mandados a fabricar a un taller de manufactura debido a las características de sus componentes. Las roscas adaptadas al receptor hembra PVC de 4", eran cónicas para permitir un mejor sello. Se debía de adaptar un niple de 1/4 para la salida de gas, para el cual se requería de una buena técnica de soldadura por ser tan pequeña la pieza.

Se requería de un tipo de soldadura que no permitiera fugas para garantizar la hermeticidad. La estabilidad estructural de la cámara se logra con las estructuras de angulares.

Según datos del taller de manufactura, se utilizó soldadura eléctrica tipo MIG. Se seleccionó este proceso, debido al espesor de la pared de los toneles 0.046". Tiene una resistencia a la tensión de 70,000 psi. Para las roscas se añadió soldadura de proceso SMAW con resistencia a la tensión de 60,000 psi (electrodo E6013).

Los toneles de aceite y el cono excéntrico están hechos de acero AISI 1008 con resistencia a la fluencia de 41500 psi. Según módulo de diseño, los esfuerzos máximos soportados en el tonel en los diferentes componentes son:

- Esfuerzo tangencial de tonel de aceite: 7368.26 psi
- Esfuerzo tangencial de cono: 4410.36 psi
- Esfuerzo soportado por tapa roscada de 2": 62.42 psi

De esta manera se tienen como factores de seguridad mínimos en cada elemento del tonel a presión:

- Factor de seguridad tonel: 5.63
- Factor de seguridad cono: 9.4
- Factor de seguridad rosca: 664.85

Por esta razón se concluye que el material acero AISI 1008 cumple con los requisitos de diseño y es adecuado para la construcción.

### 3. Estructura de madera

- Objetivo

Construir una base de madera para colocar la cámara de carga y las cámaras de digestión, cargadas con la materia.

- Materiales

- 10 vigas de madera de pino de 4''x3''x12'
- 8 vigas de madera de pino de 4''x4''x12'
- 2 tablonces de madera de pino de 2''x12''x12'
- Sierra circular
- Barreno
- 200 tornillos de 2 ½'' de longitud
- 6 pernos de 8'' de largo y 1'' de diámetro de hierro negro con sus respectivas tuercas y roldanas
- Plano de construcción (Contenido en módulo de diseño)
- Lentes y zapatos de protección
- Metro
- Marcador
- Dispositivos para barreno: broca de paleta de 1'', cabezas de desarmador para barreno
- Sierra corta círculos
- Desarmador de castigadera
- Llave Stillson
- Martillo

Ilustración 50: Sierra corta círculos y broca de paleta



Fuente: <http://www.celta.com.mx/sierras.html>

- Metodología
  - Se identificaron vigas y columnas con cortes y empalmes iguales y se les asignó nomenclatura para identificarlas.

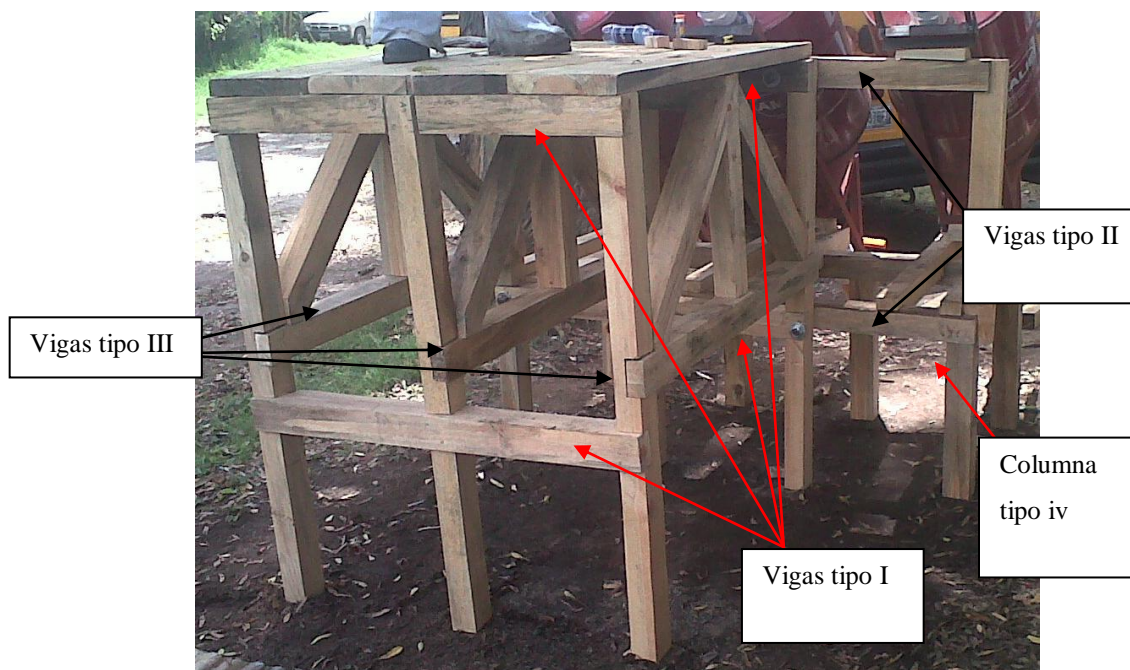
Tabla 23: Longitudes de vigas para estructura de madera

Tipo de viga	Cantidad	Longitud (in)	Área transversal (in <sup>2</sup> )
I	4	50	4x4
II	2	73	4x4
III	3	58	4x4
IV	1	50	4x4
V	1	73	4x4
VI	6	43	4x4

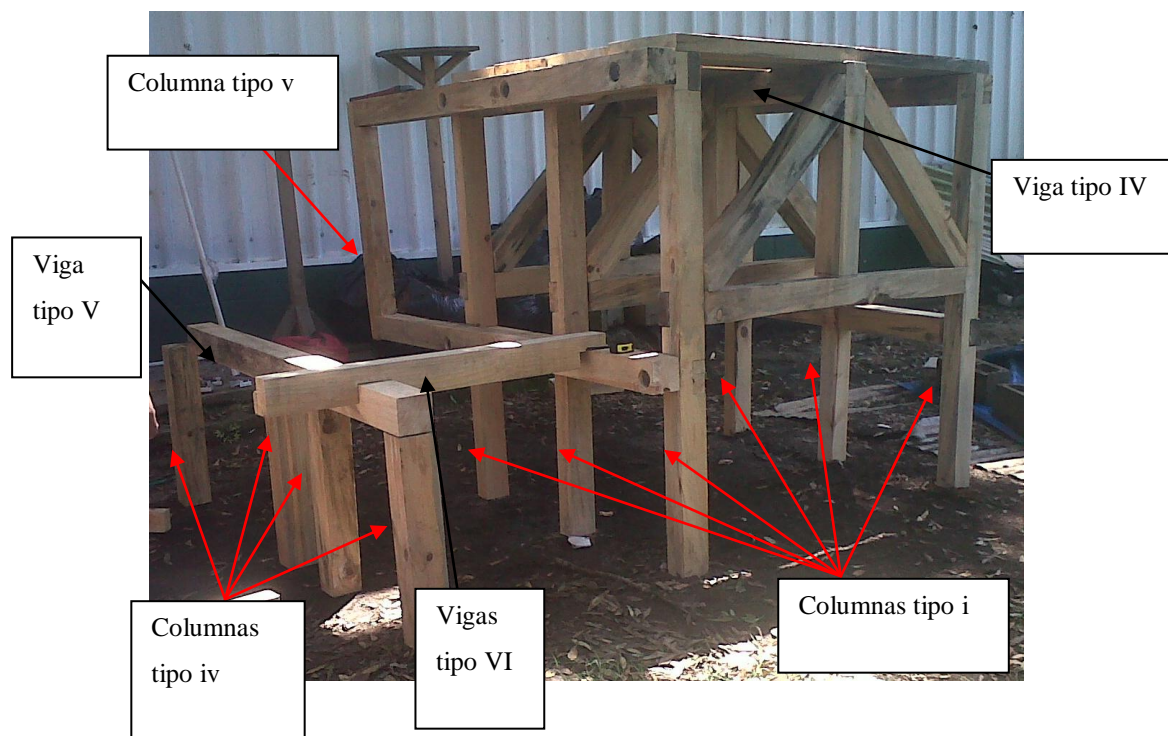
Tabla 24: Longitudes de columnas para estructura de madera

Tipo de columna	Cantidad	Longitud (in)	Área transversal (in <sup>2</sup> )
i	6	59	4x3
ii	6	34	4x4
iii	3	22.5	4x4
iv	5	22	4x4
v	1	37 3/4	4x3

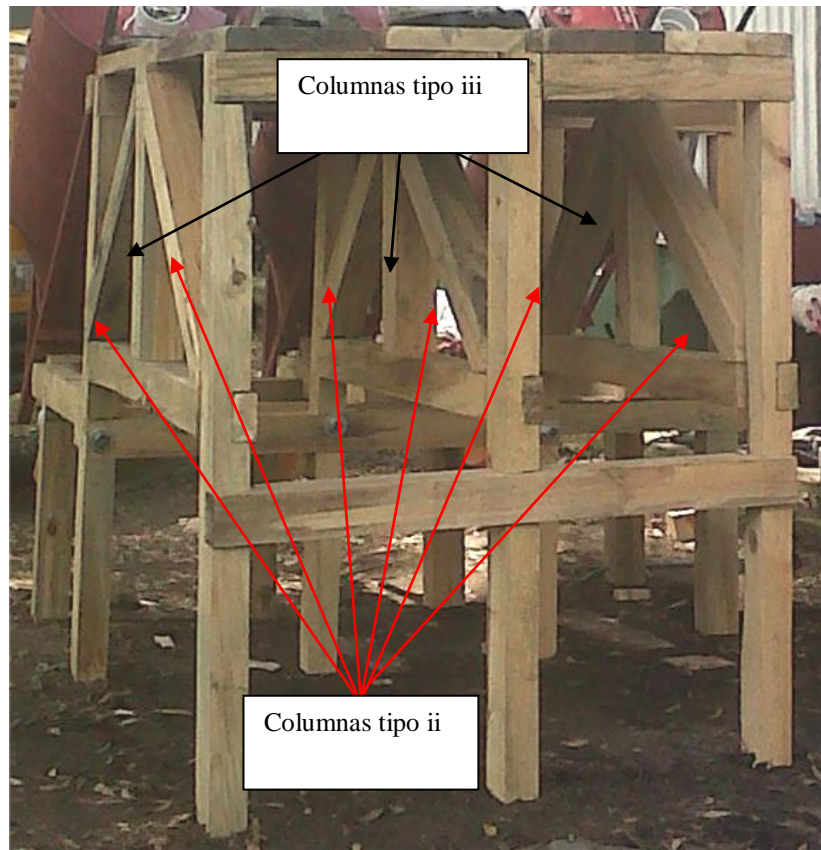
**Ilustración 51: Nomenclatura para vigas y columnas de estructura de madera ensambladas**



**Ilustración 52: Diagrama 2 para nomenclatura para vigas y columnas de estructura de madera ensambladas**



**Ilustración 53: Diagrama 3 para nomenclatura para vigas y columnas de estructura de madera ensambladas**



- Se cortaron la cantidad de vigas y columnas requeridas, en la longitud especificada acorde las Tablas 9 y 10.

**Ilustración 54: Medición de piezas de madera**



Ilustración 55: Piezas de madera cortadas



- Fueron necesarios dos cortes, haciendo el primero en cualquier cara de la viga y luego volteándola para terminar de atravesar por completo. Para los cortes se utilizaron el metro y marcador.
- Se procedió a cortar los empalmes de las dimensiones que requerían las piezas. Los empalmes se debían hacer en diferentes secciones de las vigas, como se muestra en las Tablas 11 y 12.

Tabla 25: Colocación de empalmes en vigas para estructura de madera

Tipo de viga	Lugar para el empalme
I	Extremos y en medio
II	N/A
III	Extremos
IV	N/A
V	N/A
VI	Extremo y a 26 in del extremo

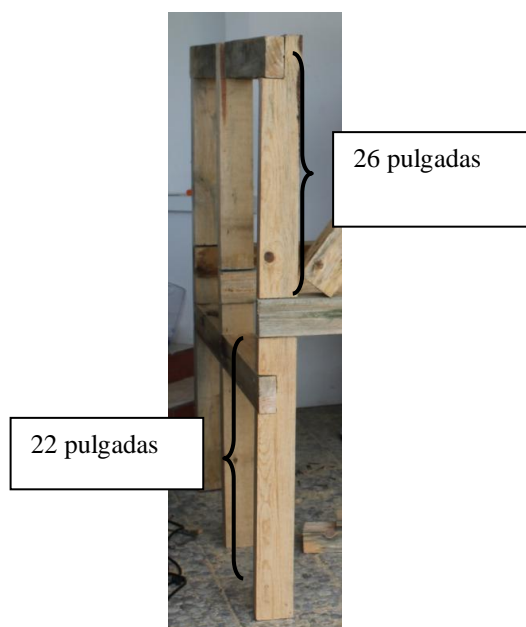
**Ilustración 56: Distancia entre empalmes de viga tipo VI**



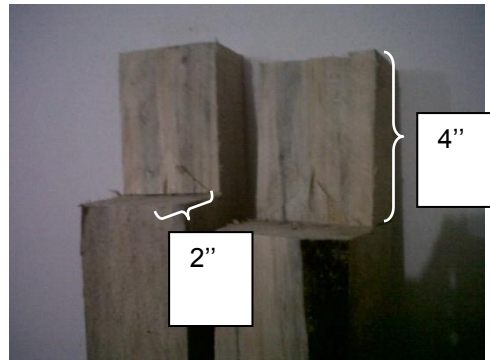
**Tabla 26: Colocación de empalmes en columnas para estructura de madera**

Tipo de columna	Lugar para el empalme
i	Extremo superior y especificaciones indicadas en Ilustración 26
ii	N/A
iii	N/A
iv	N/A
v	Extremos

**Ilustración 57: Distancia y colocación de empalmes en columna tipo i**

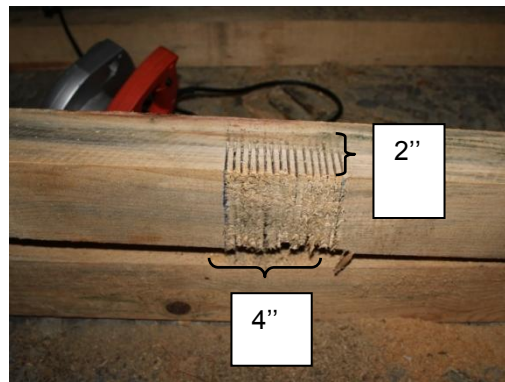


**Ilustración 58: Dimensiones de empalmes en extremo de viga o columna**



- La profundidad de todos los empalmes fue de 2'', y el largo de corte fue de 4'' (Fueran medios o extremos).
- Para los empalmes intermedios se tuvo que hacer varios cortes a lo largo de la longitud del empalme, quedando en vez de una estructura sólida de madera, varias "placas" de poco grosor que luego fueron removidas con destornillador.

**Ilustración 59: Corte de empalme en parte intermedia de piezas de madera**



**Ilustración 60: Desprendimiento de Madera en Empalmes Intermedios**



- Se procedió a ensamblar la estructura que soporta la fosa séptica, ensamblando el marco que se observa en la ilustración 26, el cual está conformado por 3 columnas tipo i y 2 vigas tipo I. No se atornilló, sólo se colocaron piezas y se hicieron cazar.
- Se ensamblaron los dos marcos por medio de las 3 vigas tipo III.
- En base al ensamblaje, se determinó el ángulo de corte de las columnas tipo II para construir la “V” a manera de que cazara, y en efecto se cortó.

**Ilustración 61: Ensamblaje para corte de columnas tipo ii**



**Ilustración 62: Columnas tipo ii cortadas y cazadas en ensamblaje**



- Se procedió a hacer agujeros en vigas tipo I y II que están unidas, para los pernos. Para esto se hizo el agujero con sierra de círculos.
- Los agujeros se ubicaron al lado de cada empalme de la columna tipo i en la viga tipo II superior. Para la viga tipo II inferior, se hizo exactamente en el empalme

de la columna. La ubicación de los agujeros se puede observar en la Ilustración 32. Se cercioró que los agujeros cazaran a manera de que se puedan ensamblar las vigas con las columnas, acorde a los diagramas mostrados.

**Ilustración 63: Colocación de agujeros para pernos a lo largo de vigas tipo II**



- La profundidad del agujero hecho con la sierra de círculos se hizo con la profundidad que proporcionaba la misma. La madera dentro del agujero era removida con desarmador.
- A continuación, se perforó por completo la viga y columna con la broca de paleta de 1". Las columnas tipo i no requieren de agujero con sierra corta círculos.

**Ilustración 64: Agujeros para pernos**



**Ilustración 65: Perno insertado en agujero para viga tipo II inferior**



- Se procedió a ensamblar los marcos en la Ilustración 26 con las seis columnas tipo i y las cuatro vigas tipo I. Para el ensamblaje, sólo se necesitó hacer casar los empalmes acorde al diagrama y colocar tornillos de sujeción, los cuales eran insertados con barreno y cabeza de desarmador. Todas las sujeciones con excepción de los pernos, fueron con tornillos.

**Ilustración 66: Ensamblaje de marco de columnas tipo i y vigas tipo I**



- Se cortaron cuatro tablonces de 58”.
- Se transportaron los marcos y el resto de piezas hacia el área donde sería ubicado el prototipo para su ensamblaje definitivo.

- Se ensamblaron los marcos con las vigas tipo III para armar la estructura principal. Luego se le adjuntaron las columnas tipo II y III para armar la “V”, junto con la viga tipo IV. También se ajustaron tablonces en la parte superior.
- Se procedió a colocar las vigas tipo II con los pernos. Se alinearon los agujeros y se insertaron pernos con martillo. La rosca fue apretada con llave Stillson.
- Se colocaron columnas tipo iv y tipo v. Observar diagramas de nomenclatura.
- Con la estructura principal que soportará la fosa séptica ya armada y ensamblada, se procedió a armar la estructura de soporte para las cámaras de digestión.
- Se comenzó por colocar la viga tipo V sobre las columnas tipo iv.
- Se procedió a colocar vigas tipo VI sobre la viga tipo II inferior, sin atornillar, sólo se hizo cazar para poder colocar piezas en la posición adecuada.
- Las columnas tipo iv se ubicaron a una distancia igual a lo largo de la viga tipo V y tipo II.

**Ilustración 67: Colocación de vigas tipo VI sobre vigas tipo V y tipo II**



- Se atornillaron columnas tipo iv a la viga tipo V.

**Ilustración 68: Columna Tipo iv Atornillada a Viga Tipo V**



- Se procedió a atornillar las vigas tipo VI a las vigas tipo II y Tipo V.
- Se colocaron cuñas para asegurar que la estructura de angular no resbale. Las cuñas fueron retazos triangulares que resultaron de cortar las columnas tipo ii.
- Por último, se terminaron de colocar los toneles en sus respectivas estructuras.

**Ilustración 69: Estructura de madera terminada con toneles colocados**



▪ **Justificación y cálculos**

Para la construcción lo primero que se tuvo que hacer es determinar en el plano de construcción, las dimensiones de las columnas o vigas y la cantidad que se requería de cada una. Viendo la forma de ensamblaje, es como se determinó también cuáles llevaban empalmes y en dónde.

Se compró madera de sección transversal de 4x4 y de 4x3 para ahorrar costos. Se decidió utilizar la madera de 4x3 para columnas debido a que la madera tiene mayor resistencia al pandeo que a la flexión. Se tomó esta decisión debido a los altos factores de seguridad de pandeo en los cálculos realizados en el módulo de diseño.

En cuanto a la construcción, cabe mencionar que la sierra de arco que se utilizó tiene una profundidad máxima de 2'' pudiéndose variar si ésta fuera menos. El corte de piezas, empalmes, etc. No requirió de mayor toma de decisiones, sólo se tuvo que seguir la metodología para trabajar en madera.

El corte diagonal de las columnas tipo II se hizo haciendo el ensamblaje explicado en la metodología. Lo único necesario fue remover el trozo de madera que evitaba que cazara. Para ensamblar no se requirió de empalme, debido a que cazaban sin necesidad de los mismos. De hecho debido a que esas columnas estaban a compresión, solo se requirieron tornillos para ajustar y que no deslizaran. Cabe mencionar que la estructura está hecha a manera de que los tornillos no tengan que soportar ningún tipo de esfuerzo (con excepción de los pernos), sino todo recaiga en la madera. Prácticamente podría armarse sin necesidad de tornillos.

El agujero para los pernos requirió de primero del agujero de la sierra corta círculos. Esto se debe a que ésta tiene una broca central para guiar la sierra. Si se hacía de primero el agujero con broca de paleta e 1'', la sierra corta círculos ya no tendría guía para poder perforar adecuadamente. Fue necesario hacer el agujero con esta sierra debido a que por costo, se compraron pernos de 8'' de longitud. Queriéndose unir dos vigas de 4'' de longitud, al perno no podría roscársele su tuerca. Por esto fue necesario hacer el agujero con la sierra corta círculos, para permitir que la cabeza del perno ingresara en la madera para que en el otro extremo, se pudiera roscar la tuerca en una longitud igual a la de la cabeza. Se usó broca de paleta de 1'' debido a que este es el diámetro del perno. Por el poco juego que existe entre el agujero y el diámetro del perno, éste se tuvo que golpear con martillo para que se insertara.

Se adquirieron pernos de 1 pulgada de diámetro y de grado 2, debido a que tenían un costo muy accesible y se encontró con que en efecto podían soportar la carga. La carga más crítica es el peso de los tres digestores con sus respectivas estructuras, llenos cada uno con 200 litros de agua. De esta manera se encuentra:

**Tabla 27: Peso de elementos de Biodigestor**

Componente	Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Peso (kg)
Angular 3/16 x 1 1/2	ASTM A36	7850	0.001646	12.9211
Tonel 55 galones	AISI 1008	7871	0.0018565	14.6125115
Agua	-	1000	0.2	200

Este peso de 227.53 N es la carga crítica, la cual es la fuerza de corte ejercida sobre el perno. Según resistencia de materiales, el esfuerzo cortante es:

$$\sigma = \frac{V}{A}$$

En donde V es la fuerza de corte y A el área transversal, que en este caso sería el área de un círculo de 1 in de diámetro. Para un perno de grado 2, el esfuerzo crítico es de 178.7 Mpa. De esta manera se presenta la tabla de resultados:

**Tabla 28: Esfuerzo cortante máximo soportado por perno**

Carga de prueba (a 2 % de deformación plástica) (Mpa)	227.52
Diámetro (cm)	2.54
Área (cm <sup>2</sup> )	5.06
Esfuerzo cortante crítico (Mpa)	178.7
Factor de seguridad	17.25

Se trató de ensamblar lo más que se pudo a manera de que pusiera transportar. Por esta razón se ensamblaron los marcos de columnas tipo i y vigas tipo I. El resto de piezas se transportó sin ensamblar para hacerlo en el lugar de ubicación del prototipo. Una vez en el lugar de ubicación, se procedió con la metodología indicada para terminar el ensamble. Se utilizaron tornillos de más de 2'' para que pudieran atravesar la profundidad de 2'' del empalme. También para que a cualquier pieza que se le deseara poner un tornillo de sujeción, la longitud no fuera ningún problema para lograr la unión. Un ejemplo de esto es la columna tipo IV. Debido a que están a compresión, la única función de los tornillos fue de sujeción.

Las cuñas fueron colocadas por seguridad ya que las estructuras de angular de los toneles se sujetaban por medio del perfil “U” a la madera.

Para minimizar costos, se compró madera de pino y se le hizo tratamiento aplicando barniz marino, el cual es adecuado para superficies a la intemperie y expuestas a la humedad. Es recomendado para lugares extremos como cerca del mar o en la montaña.

Con respecto al material que se escogió para la construcción, madera de pino, es un material que cumple satisfactoriamente con los requerimientos de diseño. El esfuerzo de fluencia de la madera a compresión está entre 30-50 Mpa y a flexión, entre 40-60 Mpa. Según datos de los esfuerzos que sufre la estructura, proporcionados por el módulo de diseño, se tienen los esfuerzos máximos:

- Esfuerzo cortante máximo: 0.0265 Mpa.
- Esfuerzo flexionante máximo: 3.98 Mpa.
- Esfuerzo cortante horizontal máximo: 0.4 Mpa
- Esfuerzo máximo de compresión: 0.33 Mpa.
- Fuerza crítica de falla por pandeo: 38,950 N

Tomando el valor más bajo para el esfuerzo de fluencia de la madera, que es 30 MPa, se tienen grandes factores de seguridad:

- Factor de seguridad de esfuerzo cortante máximo: 1132
- Factor de seguridad de esfuerzo flexionante máximo: 7.54.
- Factor de seguridad de esfuerzo cortante horizontal máximo: 75
- Factor de seguridad de esfuerzo máximo de compresión: 91
- Factor de seguridad de fuerza crítica de falla por pandeo: 45.58

El factor de seguridad más crítico es de 7.54, el cual se considera aceptable y se considera a la madera como un material satisfactorio.

#### **4. Sistema de transporte de sustrato**

- **Objetivo**

Implementar un sistema que transporte la materia desde la cámara de carga hasta la cámara de digestión, y que permita la extracción de materia. Debe permitir la manipulación del flujo del agua para controlar el llenado de cada tonel.

- Materiales utilizados
  - 3 llaves de bola de PVC de 4''
  - 2 metros de tubo PVC de 4'' pluvial
  - 6 receptores hembra PVC de 4''
  - 3 uniones PVC lisa de 4''
  - 3 reducciones PVC de 4'' a 2''
  - 4 llaves de bola PVC de 2''
  - 4 tee PVC de 2''
  - 5 codos PVC de 90°, de 2''
  - 1 unión lisa PVC de 2''
  - 3 metros de tubo PVC de 2'' pluvial
  - 1 adaptador PVC macho de 1 ½''
  - 1 llave de bola PVC de 1 ½''
  - 1 reducción PVC de 2'' a 1 ½''
  - 1 metro de tubo PVC de 1 ½'' pluvial
  - 1 reducción PVC de 2'' a 1''
  - 1 llave de bola PVC de 1''
  - 1 metro de tubo PVC de 1'' pluvial
  - Trapo
  - Sierra de arco
  - Metro
  - Pegamento para PVC
  - Lima
  - Llave de cadena
  - Compresor de anillos
  - 3 rollos de teflón de 1''
  - Diagrama de tubería de líquidos en módulo de diseño
  
- Metodología
  - Se colocó teflón a las roscas de los toneles.

**Ilustración 70: Teflón sobre roscas adaptadas a toneles**



- Se roscó el adaptador hembra de 4'' utilizando llave de cadena.

**Ilustración 71: Llave de cadena**



- Se cortó la tubería de PVC de 4 '' en porciones de 25 centímetros. Para el corte se necesitó el uso de prensa y compresor de anillos para hacer un corte recto.

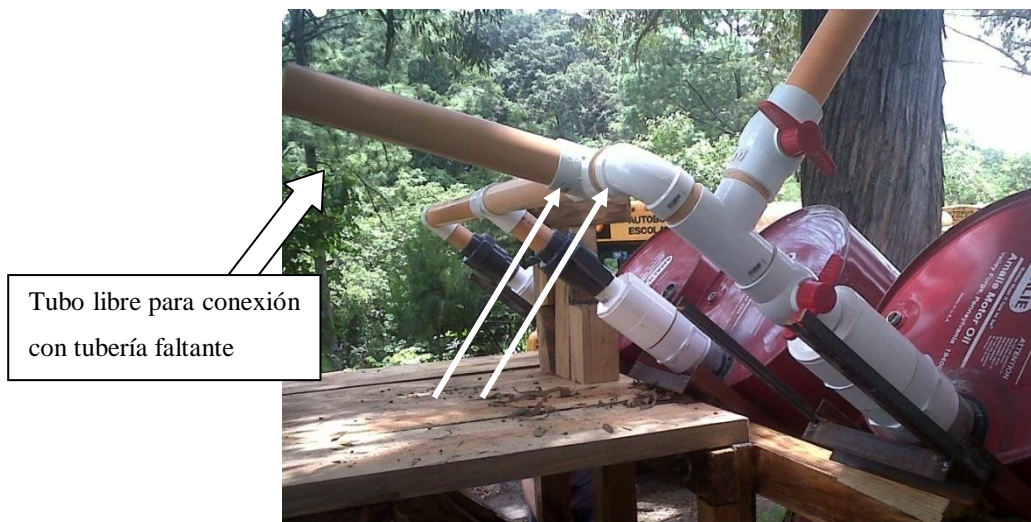
**Ilustración 72: Corte de tubería PVC de 4''**



- Se conectaron llaves de bola de 4'' a la salida de cada tonel. Esto es del lado del cono excéntrico.

- Se colocaron toneles sobre estructura de madera.
- Se tomaron medidas de las longitudes de los tubos una vez ya colocados los toneles en su posición fija. Se cortaron dichos tubos en tubería de 2". Para estos no se necesitó compresor de anillos ni prensa.
- En la parte trasera de los toneles (parte de ingreso de afluente), se adaptó la reducción de 4" a 2" con la unión lisa PVC.
- Se procedió a colocar la llave de bola de 2" de cada tonel y demás accesorios para completar la tubería del diagrama. Se acoplaron los codos, y tees.

**Ilustración 73: Tubería PVC sin Cámara de Carga**



- Todas las piezas, para ensamblarlas fueron limadas en la entrada del tubo para facilitar su colocación al accesorio. También fueron limpiadas con un trapo para que al aplicar el pegamento, éste actuará mejor.

**Ilustración 74: Preparación de tubería PVC para ser ensamblada**



- Cuando todavía no estaba colocada la cámara de carga, el codo y la tee señalados en la Ilustración 44 no se ensamblaron con pegamento, sino hasta que estuviera todo el sistema.
- Por aparte, sin conectarlo a la tubería armada anteriormente, se ensambló la llave de bola de 1 ½ al adaptador macho PVC y a la reducción de 2'' a 1 ½'' con su respectiva unión lisa.
- Una vez colocada la cámara de carga, se terminó de ensamblar la tubería acorde al diagrama. Se acopló la válvula de purga de 1''.

**Ilustración 75: Tubería PVC ensamblada con Cámara de Carga**



▪ Justificación y cálculos

Se decidió utilizar tubería PVC pluvial debido a que la presión en la misma no será alta y tiene menor costo. Según el proveedor, el PVC pluvial resiste hasta 36 psi de presión. La presión máxima que tendrá que soportar esta tubería es la de la altura total del agua contenida en la cámara de carga. Siendo  $h$  la altura de agua en el contenedor de la cámara de carga,  $\rho$  la densidad del agua y  $g$  la gravedad, se tiene:

$$P = \rho * g * h = 1000 * 9.81 * 1.38 = 13,537.8Pa = 1.96 \text{ psi}$$

El valor de 1.38 metros es la altura del contenedor de la cámara de carga. Asumiendo que se llena por completo la fosa séptica, esta será la mayor altura de presión que tendrá que soportar la tubería.

Se escogieron válvulas de esfera por la disponibilidad, ya que son las más comunes para tubería PVC. En la salida de la cámara de digestión se colocó diámetro de 4 pulgadas debido a que habrá sedimentación de sólidos en la parte inferior del tonel, por lo que al querer extraerse la materia, conviene tener mayor área de flujo para facilitar la salida. En la entrada se colocó tubería de 2 pulgadas para reducir el costo, además de que es el diámetro mínimo utilizado para aguas servidas. Esto se investigó con proveedores y se observó que los diámetros comunes para transportar aguas servidas estaban en un rango entre 2 y 6 pulgadas. También se encontró que para inodoros de casas, se utiliza tubería de 2 pulgadas, por lo que se consideró que era adecuado utilizar este diámetro de tubería para la conexión con la cámara de carga.

Para la salida de la cámara de carga se utilizó tubería de 1 ½" debido a que es el diámetro de salida con el que estaba fabricada la fosa séptica que se implementó como cámara de carga. Se le colocó una tee con una salida de tubería de 1" por tres razones: la primera es para drenar la tubería una vez estén cargados los toneles, para evitar generación y presurización dentro de la tubería. La otra razón es que debido a que en la cámara de carga quedará estancado un volumen significativo de agua, si por alguna razón éste necesita drenarse, se puede hacer por medio de esta válvula. La tercera es para liberar de presión a la tubería.

Con respecto al ensamblaje, se colocó teflón en las roscas como sello y se apretó con llave de cadena debido a que ninguna llave del taller era lo suficiente grande para apretar rosca de 4 pulgadas. Hay que mencionar que el roscado de los toneles es cónico, creando un mejor sello con el teflón. Se requirió compresor de anillos y prensa para cortar la tubería de 4 pulgadas debido a que por lo blanda que es, se deformaba y el corte resultaba muy torcido.

Las llaves de bola de 4 pulgadas fueron adaptadas antes de colocar los toneles en la estructura de madera debido a que por la posición en la que iban a estar (inclinadas hacia abajo), iba a ser más complicado colocarlas en ese estado.

## 5. Cámara de almacenamiento de gas

- Objetivo

Construir una cámara de almacenamiento de gas de volumen variable utilizando un sistema cilindro émbolo. Ésta debe tener la capacidad de almacenar 55 litros de biogás. Debe permitir tomar mediciones de volumen generado.

- Materiales utilizados

- Contenedor plástico de 20 galones (75.6 litros). Dimensiones: Altura: 61 centímetros. Máximo diámetro interno (parte superior): 46 centímetros. Diámetro interno mínimo (parte inferior): 35 centímetros.

**Ilustración 76: Contenedor de 75 litros**



- Contenedor plástico de 130 litros. Dimensiones: Altura: 74 centímetros. Máximo diámetro interno: 56 centímetros.

**Ilustración 77: Contenedor de 130 litros**

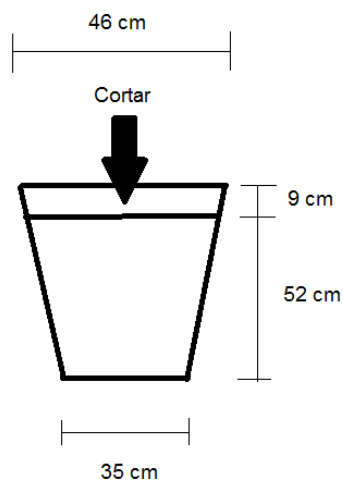


- 9 abrazaderas de tornillos sin fin.
- 6 metros de tubo PVC de agua caliente de ½”.
- 50 libras de cemento.
- 4 yardas de manguera de vinyl transparente de ¼”.
- Llave de bola de ¼”.
- 3 adaptadores de 1/4" NPT a 1/4" vástago manguera.
- Barreno con broca de paleta de 1”.
- Sierra de arco o cuchillo de cocina.
- 1 metro de alambre de amarre.
- Rollo de teflón de ½”.

▪ Metodología

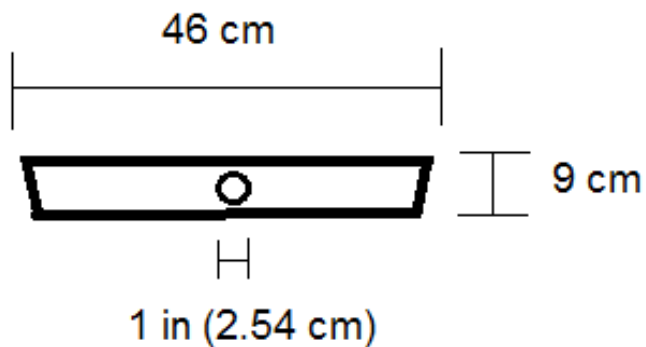
- Se cortó al contenedor de 20 galones una sección de 9 centímetros de altura medidos de la parte superior del mismo. Así se tienen 2 partes: el contenedor con 52 centímetros de altura (61 originales menos los 9 removidos) y un cilindro de aproximadamente 46 centímetros de diámetro y 9 centímetros de altura (la parte cortada), que cumplirá la función posteriormente como molde para cemento.

**Ilustración 78: Vista lateral para corte de contenedor**



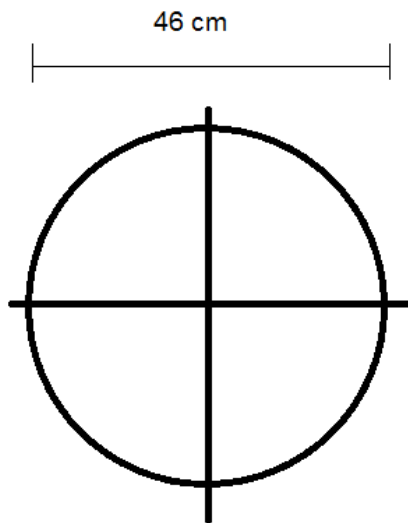
- A las paredes del molde de cemento se le hicieron 4 agujeros de 1 pulgada con la broca de paleta. Los agujeros deben ser opuestos y separados a 90° sexagesimales uno del otro.

**Ilustración 79: Boceto de vista lateral de molde para cemento con agujeros con broca de paleta**



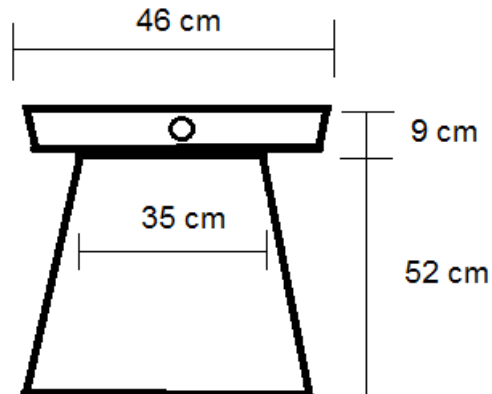
- Se colocaron secciones de tubo PVC de agua caliente de ½” de diámetro y 50 centímetros de longitud, a través de los agujeros hechos en el paso anterior, formando una cruz. Para referencia observar “Tubo PVC de unión” en la ilustración 51.

**Ilustración 80: Boceto de vista de planta de corte de contenedor para colocación de tubos PVC de agua caliente**



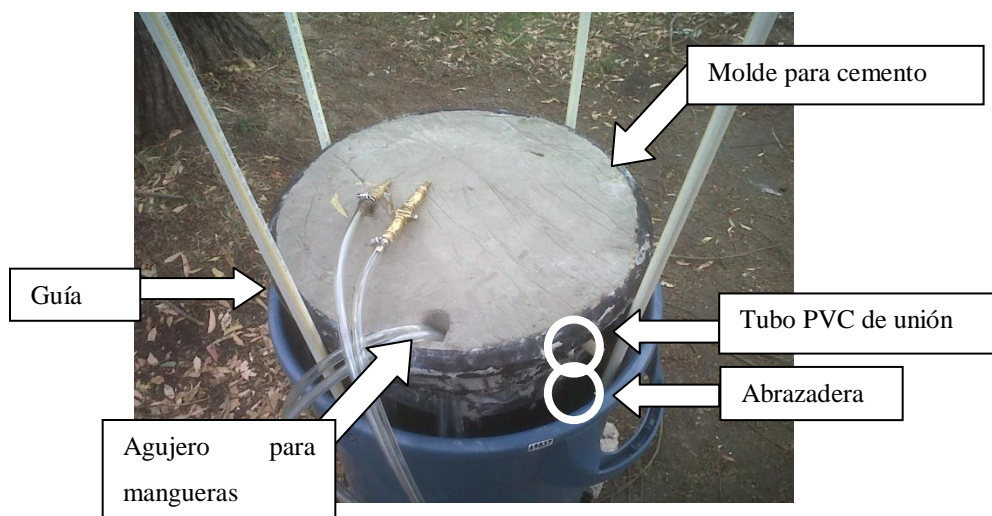
- Se adjuntó por medio de la cruz de PVC, el molde de cemento a la parte inferior del contenedor (a la de 35 centímetros de diámetro). Para adherirlos se utilizó “Duct Tape”. De esta manera se elabora el pistón o émbolo de la cámara de gas.

**Ilustración 81: Boceto de vista lateral para émbolo de cámara de almacenamiento de gas**



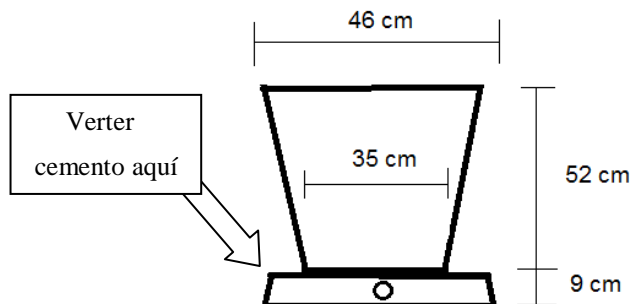
- Se hicieron perforaciones en el contenedor de 130 litros a 61 centímetros de altura con el cuchillo de cocina y separados  $90^\circ$  entre sí. Para hacer fácil la perforación se calentó la punta del cuchillo.
- Se adhirieron los tubos PVC de agua caliente en la parte interna del contenedor de 130 litros. La longitud de los tubos fue de 1 metro. Esto se hizo insertando las abrazaderas en las perforaciones que se le hicieron y apretándolas con el tubo PVC dentro de las mismas. Para referencia, observar las guías y la abrazadera en la ilustración 82.

**Ilustración 82: Componentes de Gasómetro**



- Se hizo mezcla de cemento con agua.
- Se colocó el émbolo de modo que el molde de cemento quede hacia abajo contra el suelo y se le colocó una pieza cilíndrica para hacer el agujero donde irían las mangueras que se observa en la Ilustración 82.
- Se vertió la mezcla dentro del molde como se indica en la ilustración 83:

**Ilustración 83: Boceto de diagrama para verter cemento**



- Se esperó un día para que el cemento se endureciera.
- Se llenó de agua el contenedor de 130 litros.
- Se cortó la manguera de vinyl de 4 yardas en 2 partes iguales.
- Ambas partes se doblaron con un giro de 180° (en forma de U) y se utilizó alambre de amarre para que el doblado se mantuviera. Un lado del doblado o de la "U" debe medir desde el alambre de amarre hasta el extremo de la manguera, 50 centímetros.
- Se insertó el extremo de 50 centímetros dentro de un tubo PVC de 45 centímetros de longitud, para darle rigidez.
- Se colocó la "U" de modo que el extremo rígido se ubicara dentro del émbolo y el otro fuera, para extraer por el agujero para mangueras (en el cemento), el otro extremo de la "U". Observar Ilustración 51 como referencia para observar cómo deben extraerse las mangueras por el agujero.
- Se ensambló el sistema cilindro émbolo, ingresando el contenedor pequeño dentro del de capacidad de 130 litros.
- En los extremos de la manguera externos, se adaptaron los vástagos de manguera. Se adaptó con abrazadera para mayor seguridad. A uno de los extremos se le colocó la llave de bola y a ésta se le adaptó otro vástago de manguera. En las roscas se le colocó teflón.
- El dispositivo final ensamblado se muestra en la Ilustración 84.

**Ilustración 84: Cámara de almacenamiento de gas**



- Al estar instalado se taró a una altura específica con una marca.
- Para medir volumen generado sólo fue necesario medir la altura  $h$  que se elevó a partir de esa marca, en centímetros.

**Ilustración 85: Marca de altura inicial de émbolo de cámara de almacenamiento de gas**



- Este valor fue ingresado en una ecuación que devuelve el valor de volumen en litros:

$$V(h) = \frac{\pi * (0.003h^3 + 1.6625h^2 + 306.25h)}{1000} \text{ [litros]}$$

- Justificación y cálculos

La cámara de gas es prácticamente un sistema cilindro-émbolo con sello de agua, en el que el émbolo es hueco, debido a que ahí se almacena el biogás. Al ser un sistema de este tipo, es de volumen variable y presión constante. De los materiales descritos, el contenedor de 20 galones (75 litros) cumplirá la función de émbolo y el de 130 litros, la del cilindro que lo contiene.

El corte de 9 centímetros al recipiente de 20 galones se hizo con tres propósitos: para que en efecto el contenedor de 20 galones cupiera dentro del de 130 litros pues la sección de mayor diámetro no lo permitía. La segunda razón fue que según el diseño, el émbolo debe tener un peso encima que ejerza una fuerza para generar una baja presión. La masa se tenía pensado que fuera cemento, y este cilindro cortado cumpliría con la función de molde para el mismo. La tercera razón fue que este molde de mayor diámetro, ajusta el émbolo a las guías de PVC, de otra manera, habría mucho juego entre el émbolo y el cilindro al moverse debido a que el diámetro menor del émbolo es de 35 centímetros y el del cilindro es de 56 centímetros.

Para obtener el valor de 9 centímetros se calculó que lo máximo que se podía remover de volumen eran 20 litros, debido a que el contenedor tiene una capacidad de 75.6 litros y el gasómetro debe tener por lo menos un volumen de 55 litros. Como se debía remover una parte de diámetro máximo de 46 centímetros (0.46 metros), se calculó la altura para un cilindro de dicho diámetro y 20 litros de volumen. Con la fórmula de volumen de un cilindro, en la que  $V$  es el volumen,  $A$  el área de la cara y  $h$  la altura del cilindro, el cálculo se hizo de la siguiente forma:

$$V = A * h$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi * 0.46^2}{4} = 0.166 \text{ m}^2$$

$$20 \text{ litros} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ litros}} = 0.02 \text{ m}^3$$

$$h = \frac{V}{A} = \frac{0.02}{0.166} = 0.12 \text{ m} = 12 \text{ cm}$$

Este valor de 12 cm es la máxima altura que se le puede remover al contenedor de 20 galones medido a partir de la parte superior. Debido a que se le quería dejar la máxima capacidad posible, se tanteó una altura menor a 12 cm en la que el contenedor pequeño ya cupiera dentro del grande. Esta altura fue la de 9 cm.

Para la unión del molde con el émbolo no fue necesario algo de mayor resistencia al “Duct Tape” debido a que éste y el tubo PVC no soportan ningún esfuerzo, pues el peso del cemento es transmitido a las paredes del contenedor por medio de la presión y la fuerza boyante la fuerza de reacción opuesta. Básicamente la única función del PVC y “Duct Tape” era adherir la parte de mayor diámetro a la de menor, sin soportar ninguna clase de esfuerzo.

Para calcular el peso del cemento a utilizar se calculó con la densidad y volumen del molde a llenar. Debido a que se considera como un cilindro de 9 centímetros de altura y 46 centímetros de diámetro, con la ecuación de volumen de un cilindro se calculó el volumen a llenar:

$$h = 9 \text{ cm} = 0.09 \text{ m}$$

$$d = 46 \text{ cm} = 0.46 \text{ m}$$

$$V = \pi * \frac{d^2}{4} * h = \pi * \frac{0.46^2}{4} * 0.09 = 0.015 \text{ m}^3$$

Tomando la densidad media del cemento ( $\rho$ ) como 1500 kg/m<sup>3</sup>.

$$m = \rho * V = 1500 * 0.015 = 22.5 \text{ kg} = 49.5 \text{ lb}$$

Así es como se decidió que el peso de cemento necesario era de 50 libras. Se decidió cemento debido a que se necesitaba algo compacto que proporcionara el peso necesario para presurizar el biogás.

Para calcular la presión a la cual se encuentra el gas se utilizaron las 50 libras de cemento sobre una circunferencia de 35 centímetros de diámetro (13.78 pulgadas). Este diámetro es el menor del contenedor de 20 galones sobre el cual está aplicada la presión. Se utiliza la fórmula en la que:

$$P = \frac{F}{A}$$

Donde F es la fuerza aplicada en libras, A es el área en pulgadas cuadradas y P es la presión en psi. El cálculo da como resultado:

$$P = \frac{50 \text{ lb}}{\pi * \frac{(13.78 \text{ in})^2}{4}}$$

$$P = 0.335 \text{ psi}$$

Esta presión es menor a la de la altura de agua que se encuentra en el recipiente de 130 litros ya que está a 61 cm. La presión de agua se calcula:

$$g \text{ (gravedad)} = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\rho \text{ (densidad del agua)} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$h \text{ (altura de agua)} = 61 \text{ cm} = 0.61 \text{ m}$$

$$P = \rho * g * h = 1000 * 9.81 * 0.61 = 5984.1 \text{ Pa} = 0.868 \text{ psi}$$

Esto se traduce en que al ser mayor la presión del agua que la del peso del cemento, el biogás siempre desplazará al émbolo en vez de desplazar al agua y salirse por debajo de ésta. Con la presión de 0.335 psi de gasómetro, se cumple el parámetro dado en la tabla de Deublein, Dieter para gasómetros de baja presión, que es entre 10-50 mbar, es decir, entre 0.145 – 0.725 psi.

Para calcular que los contenedores plásticos escogidos son adecuados para la fabricación del gasómetro se hizo el cálculo utilizando la ecuación para cilindros presurizados de pared delgada. Según la teoría, el cilindro de pared delgada sufre esfuerzos radiales insignificantes, por lo que solo se presentan esfuerzos tangenciales y longitudinales. Las ecuaciones son las siguientes:

$$\sigma_t = \frac{p(d_i + t)}{2t}$$

$$\sigma_l = \frac{pd_i}{4t}$$

$\sigma_t$  = esfuerzo tangencial

$\sigma_l$  = esfuerzo longitudinal

p = presión en el cilindro

$d_i$  = diámetro interno

t = grosor

Debido a que se tienen sus dimensiones, (diámetro y grosor) y se conoce que el material es polipropileno (con un esfuerzo de 361.93 psi), se presenta a continuación la presión que pueden soportar los contenedores plásticos y el factor de seguridad:

**Tabla 29: Cálculo de presión para contenedor de 20 galones**

<b>20 galones</b>	
diámetro interno(cm)	35.01
grosor t (cm)	0.10
$\sigma$ material* (Mpa)	2.49
presión tangencial (Kpa)	14.2
presión máx (Kpa)	0.24
factor de seguridad	6.16

**Tabla 30: Cálculo de presión para contenedor de 130 litros**

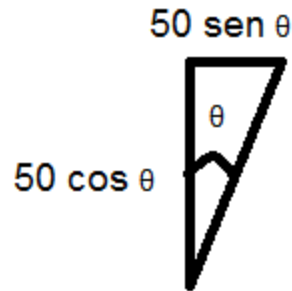
<b>130 Litros</b>	
diámetro interno(cm)	45.99
grosor t (in)	0.299
$\sigma$ material * (Mpa)	2.49
presión tangencial (Kpa)	32.34
presión máx (Kpa)	8.29
factor de seguridad	3.89

Como se mencionó anteriormente, el peso del cemento es transmitido a las paredes del contenedor por medio de la presión y la fuerza boyante es la de reacción opuesta. Es decir no sólo el contenedor soporta el peso del cemento, pues como está lleno de aire en su interior, en realidad al cemento lo está soportando lo que se interpreta como un sólido compacto hecho de aire, que está contenido en el plástico. Por esta razón, se considera que el esfuerzo que se transmite a los contenedores es el ejercido por la presión interna del cilindro.

Las guías cumplen con la función de mantener en correcta posición al émbolo cuando éste suba. Se utilizó PVC de grosor 0.059'' y diámetro externo de 5/8''. Al desviarse el pistón y caer sobre las guías PVC, éste tocará sólo en un punto el PVC, por lo que la guía se comporta como una viga empotrada con carga puntual. Esta fuerza puntual será proporcional al peso del cemento

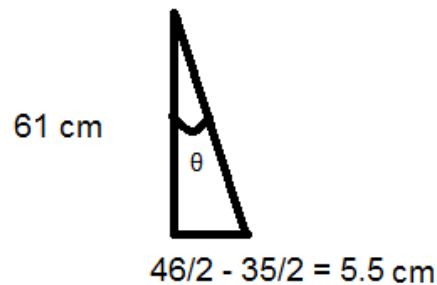
en una magnitud equivalente al seno del ángulo que se desvíe. En la siguiente Ilustración, el ángulo  $\theta$  es el de desviación con respecto a la vertical:

**Ilustración 86: Ángulo de incidencia de peso de cemento en gasómetro**



El ángulo máximo de desviación se considera que es el ángulo que tiene la pendiente del contenedor de 20 galones. Debido a que se tiene la altura total del contenedor (61 cm) y los diámetros interno (35 cm) y externo (46 cm), se puede armar el triángulo:

**Ilustración 87: Triángulo para Ángulo de Desviación Máximo de Émbolo de Gasómetro**



De esta manera se encuentra la máxima desviación del émbolo:

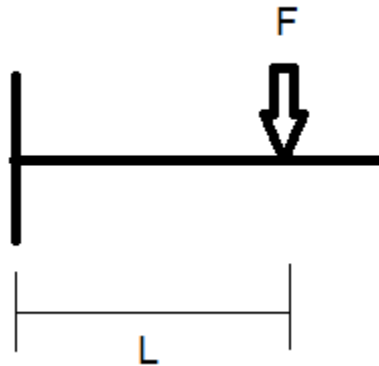
$$\theta = \arctan\left(\frac{5.5}{61}\right) = 5.15^\circ$$

Es decir, la fuerza máxima puntual que soportará el tubo PVC es:

$$F = 50 \text{ sen } 5.15 = 4.49 \text{ lb}$$

Luego se analiza la guía PVC como una viga empotrada de la siguiente manera:

**Ilustración 88: Boceto de viga empotrada para guía PVC de gasómetro**



Donde F es la fuerza de 4.49 lb y una longitud L de 12'' debido a que experimentalmente se encontró que si se eleva el émbolo a más altura que esto, las guías dejan de cumplir su función, es decir ya no corrigen la trayectoria del émbolo. Esto se debe a la forma en que están adheridos al contenedor de 130 litros, no mantienen una posición vertical sino diagonal y llega a un punto en que el émbolo ya no tiene contacto con las guías.

En una viga empotrada, el momento flexionante máximo es la fuerza multiplicada por la longitud:

$$M = FL = 4.49 * 12 = 53.85 \text{ lb} * \text{in}$$

Se obtiene también momento de inercia del área:

$$I = \frac{\pi}{64}(d_{ext}^4 - d_{int}^4) = \frac{\pi}{64}(0.625^4 - 0.507^4) = 0.00425 \text{ in}^4$$

Por último, se encuentra el esfuerzo flexionante:

$$\sigma = \frac{MC}{I} = \frac{53.85 * 0.3125}{0.00425} = 3,963.2 \text{ psi}$$

C es el centro de masa en pulgadas, el cual es el radio máximo.

El esfuerzo de tracción del PVC es aproximadamente 7100 psi. Se puede considerar como el esfuerzo último, debido a que al flexionarse una viga, en la parte inferior se somete a tensión y en la superior, a compresión. De esta manera se tiene un factor de seguridad de 1.79 para el PVC. Se presenta a continuación una tabla de resumen de resultados:

**Tabla 31: Cálculo de viga empotrada para guía PVC**

Peso cemento (N)	222
Ángulo de incidencia (°)	5.15
Fuerza P (N)	1.99
Longitud L (cm)	30.48
d ext (cm)	1.58
d int (cm)	1.29
Momento de inercia del área I (in <sup>4</sup> )	4.2E-3
Centro de masa C (cm)	0.793
Esfuerzo flexionante máximo (Mpa)	27.32
Esfuerzo último PVC (Mpa)	48.95
Factor de seguridad	1.79

Para colocar las guías se tuvo la complicación de que las abrazaderas no tenían la longitud suficiente para ajustar el diámetro del tubo PVC. Para solucionar esto se unieron abrazaderas una con otra, insertando el extremo de una en el tornillo sin fin de la otra. Una vez unidas ya solo se procedió a insertarlas en el contenedor grande, y luego apretarlas hasta quedar bien ajustado el tubo PVC.

En cuanto a las mangueras, a la parte del dobléz o de la “U” que iba insertada en PVC, se hizo de esta manera para que se mantenga erguida y no se sumerja en el agua. El extremo de manguera sin llave de paso es el que será adaptado al resto de tubería de gas por medio de una tee de cruz.

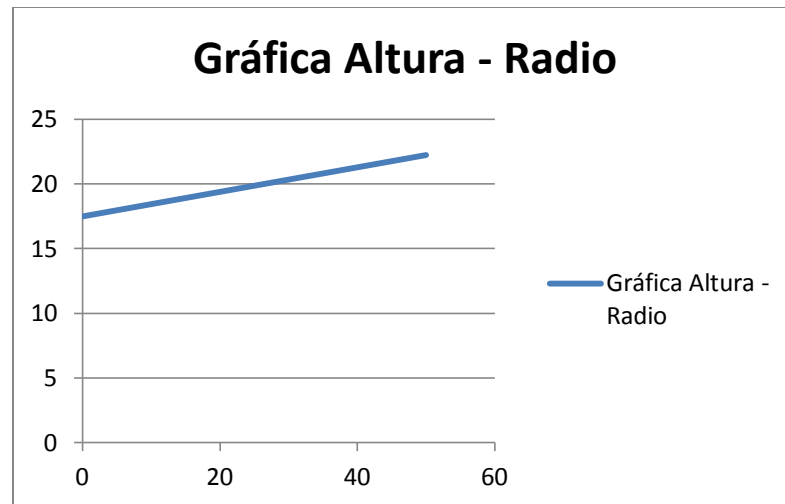
#### *Medición de volumen generado*

Para plantear la ecuación de volumen en función del radio se debe tener en cuenta que no es un cilindro el contenedor. Se planteó que el radio del émbolo varía linealmente con su altura. Para esto se utilizaron las mediciones iniciales del recipiente. Considerando la altura  $h$  como la variable independiente y el radio  $r$  como la dependiente, se consideraron como puntos (0, 35/2) y (50, 44.5/2) debido a que el contenedor de 20 galones, en la parte inferior (altura 0 cm) tiene un

diámetro de 35 centímetros y a 50 centímetros de altura, 44.5 centímetros. Este último punto fue medido manualmente con metro.

En la gráfica 1 se observa la variación lineal del radio con respecto a la altura. En el eje de las abscisas se encuentra la altura y en el de las ordenadas, el radio.

**Gráfica 3: Variación de radio con respecto a la altura de recipiente de 20 galones**



El volumen a cualquier valor de altura será el de un sólido en revolución en este valor. Para esto es necesario integrar:

$$V(h) = \int_0^h \pi * r^2 dh$$

El volumen es igual a la suma de muchos cilindros de altura diferencial  $dh$  y radio  $r$  el cual es definido por la función que se planteará a continuación.

Para encontrar la pendiente de la función  $r$  se utilizó álgebra básica en la que la pendiente  $m$  utilizando como puntos  $(0, 17.5)$  y  $(50, 22.25)$ , es:

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = \frac{23 - 17.5}{50 - 0} = 0.095$$

Ahora utilizando el primer punto  $(0, 17.5)$ , despejando para  $b$ :

$$r = m * h + b$$

$$17.5 = b$$

Por lo tanto la función  $r(h)$  resulta:

$$r(h) = 0.095h + 17.5$$

Al sustituir en la ecuación de sólido en revolución:

$$V(h) = \int_0^h \pi * (0.095h + 17.5)^2 dh$$

$$V(h) = \int_0^h \pi * (0.009025h^2 + 3.325h + 306.25) dh$$

$$V(h) = \pi * (0.003h^3 + 1.6625h^2 + 306.25h)$$

Debido a que esta función da volumen da el resultado en centímetros cúbicos, se hace la conversión:

$$1 \text{ cm}^3 * \frac{1 \text{ m}^3}{1 \times 10^6 \text{ cm}^3} * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}$$

Por esta razón, para obtener volumen en litros, la ecuación se divide entre 1000:

$$V(h) = \frac{\pi * (0.003h^3 + 1.6625h^2 + 306.25h)}{1000} \text{ [litros]}$$

De esta manera al ingresar la altura en centímetros, se obtiene volumen en litros.

## 6. Sistema de transporte de gas

- Objetivo

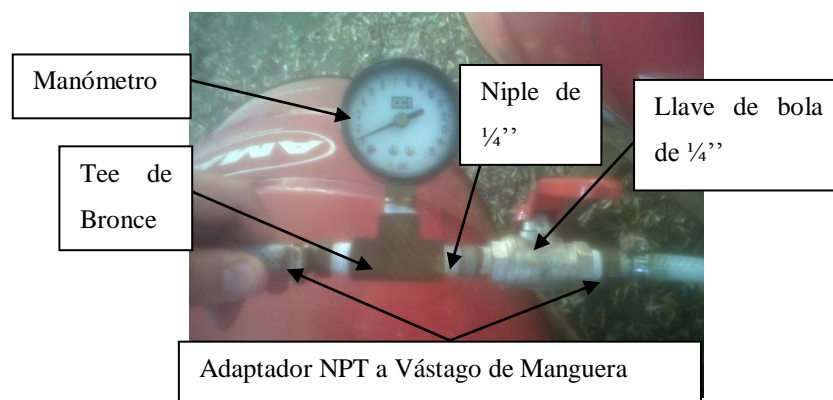
Implementar un sistema que transporte el gas generado en las cámaras de digestión, hacia la cámara de almacenamiento de gas para poder medir la producción de cada tonel individualmente.

- Materiales

- 3 llaves de paso de 1/4"

- 3 manómetros verticales de rango 0-15 psi
  - 1 cruz de acero galvanizado de ¼’’
  - 10 adaptadores de ¼’’ NPT a ¼’’ vástago de manguera
  - 13 abrazaderas de tornillo sin fin
  - Desarmador Philips y de castigadera
  - 3 niples de hierro negro de ¼’’
  - 3 yardas de manguera de vinyl reforzada de ¼’’
  - 3 tee de bronce de ¼’’
  - 4 rollos de teflón de ½’’
  - 2 alicates
  - Diagrama de tubería de gas
- Metodología
    - Se colocó teflón a las roscas de los niples, los manómetros y los adaptadores de ¼’’ NPT a ¼’’ vástago de manguera.
    - Se armó el sistema llave de paso-manómetro. Para esto se enroscaron a la tee de bronce de ¼’’, el niple, el adaptador de ¼’’ NPT a ¼’’ vástago de manguera y el manómetro. Luego la llave de paso se enroscó al niple y al otro lado de ésta, se le colocó otro adaptador de NPT a vástago de manguera.

**Ilustración 89: Sistema llave de paso-manómetro**



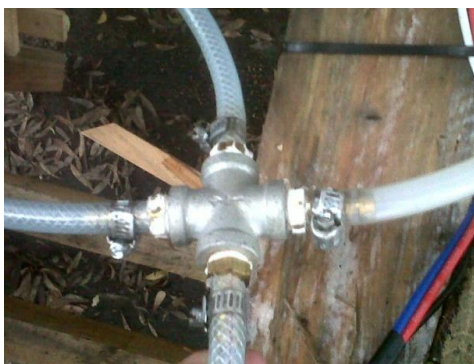
- Se conectó una llave de paso a la salida de cada tonel.

**Ilustración 90: Llave de paso acoplada a salida de gas de cámara de digestión**



- Se hizo el resto de conexión de tubería acorde al diagrama, conectando la salida de cada sistema llave-manómetro a la cruz y a la salida de la tee de cruz se adaptó la manguera que conecta a la cámara de gas.

**Ilustración 91: Cruz de tubería de gas**



- Siempre que se acoplaba una manguera a un vástago, se utilizó abrazadera de tornillo sin fin.

**Ilustración 92: Abrazadera de tornillo sin fin adaptada a manguera en salida de gas**



- **Justificación**

El sistema de tubería de gas se puede dividir en dos fases: una de alta presión y otra de baja. Esta alta presión quiere decir que es relativamente mayor que la otra. La llave de paso es el mecanismo que divide estas dos fases. De un lado está la presión de la cámara de digestión y del otro, la de la cámara de almacenamiento de gas. En la fase de baja presión, se espera tener 0.335 psi constantes (la presión de la cámara de gas), debido a que es de volumen variable. En la fase de alta presión se tendrán valores entre 0 y 15 psi ya que el volumen no es variable y es donde se da la generación de biogás.

Por la razón dicha anteriormente, en la zona de alta presión se utilizó manguera reforzada mientras que en la otra, manguera de vinyl transparente. La manguera reforzada puede resistir presiones hasta de 100 psi, lo cual fue comprobado experimentalmente. Se adaptó la manguera a un compresor con un accesorio específico que fue proporcionado en el lugar donde se hizo la prueba. En el otro extremo se le colocó un cilindro que cupiera en el agujero de la manguera, y se apretó con una abrazadera. Luego se encendió el compresor variando la presión de operación con una válvula reguladora de presión, que ya tenía el sistema del compresor del lugar en donde se hizo la prueba. Se subió la presión hasta un poco más de 80 psi y al ver que no cedió, no se consideró necesario hacerla llegar a los 100 psi para hacerla fallar. De igual manera la presión esperada dentro de los toneles no es mayor a 15 psi, por lo que al terminar la prueba, se consideró adecuada la manguera.

## **7. Cámara de carga**

- **Objetivo**

Implementar una cámara de carga que con la capacidad de contener los sólidos de la fosa séptica del área de buses del Colegio Americano, y adaptarla al resto de componentes del prototipo. Ésta así mismo debe ser cargada para la puesta en funcionamiento del equipo.

- **Materiales**

- Fosa séptica de 1100 litros. Dimensiones de 1.08 metros de diámetro y altura de 1.38 metros.

**Ilustración 93: Fosa séptica de 1100 litros**



➤ Escalera

**Ilustración 94: Escalera de acceso a la entrada de cámara de carga**



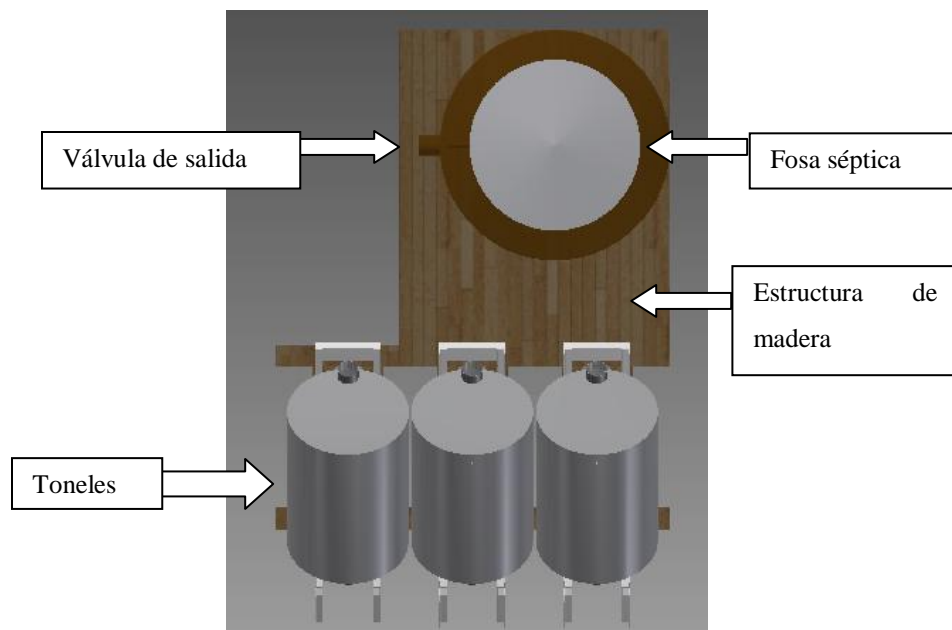
➤ Equipo utilizado por empresa de limpieza de fosas sépticas.

**Ilustración 95: Bomba de drenado de fosa séptica**



- Equipo de protección personal
  - Llave de bola PVC de 1 ½’’ ensamblada con el adaptador macho del mismo diámetro.
  - Llave Stillson (llave de tubo).
- Metodología
- Se adquirió la fosa séptica indicada en la sección de “materiales” y se transportó a la Universidad por medio de flete.
  - Entre dos personas, se colocó sobre la estructura de madera en que la válvula de salida apunte como se muestra en la Ilustración 96. También se trató de colocar lo más pegado a la esquina que observa en la ilustración.

**Ilustración 96: Bosquejo de vista de planta para colocación de fosa séptica**



**Ilustración 97: Colocación de fosa séptica sobre estructura de madera**



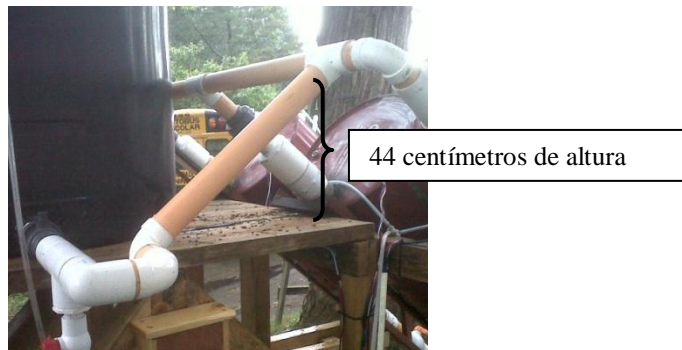
- Se le removió la válvula de salida (desenroscándola) para colocarle la de PVC, enroscando el adaptador macho en la salida del contenedor, utilizando llave Stillson.

**Ilustración 98: Colocación de llave PVC de 1 1/2"**



- Luego de haber ensamblado el resto de tubería PVC, se esperó un día para que secara el pegamento.
- Se utilizó el servicio de una empresa de limpieza de fosas sépticas para drenar cargar la cámara del prototipo con la material de la fosa séptica del área de buses del Colegio Americano.
- El llenado de la cámara consistió en introducir una bomba dentro de la fosa séptica de donde provenía la materia, bombear los sólidos hacia un tanque y luego de este tanque, hacia la cámara de carga del prototipo. Se requirió del uso de una escalera para que se tuviera acceso a la tapa de la cámara del prototipo.

**Ilustración 99: Altura de tubería PVC**



**Ilustración 100: Fosa séptica montada sobre estructura de madera**



- Justificación y cálculos

El sistema de toneles o cámaras de digestión tienen un volumen total de ocupación de sólidos de 591.75 litros (se redondea a 600 litros) y la fosa séptica tiene una capacidad de 1100 litros. Es decir se requiere que la cámara pueda proporcionar un mínimo de 600 litros de carga.

El movimiento de agua con excretas a través de la tubería será natural. Es decir no se utilizará bomba ni otro equipo. El agua fluirá por diferencia de alturas (energía potencial). Intentará igualar la presión de agua en los toneles a la de la cámara de carga. Para esto se requiere una diferencia de alturas.

Como se observa en la Ilustración 100, no se tiene la altura total de la fosa séptica para hacer fluir el agua, ya que la tubería está elevada en 44 centímetros debido a los accesorios que tiene. Sin embargo se calculó que de igual manera, la cámara de carga proporciona el volumen de materia necesario. Para determinar esto, se consideró un cilindro de agua del diámetro de la fosa séptica (1.08 metros) y altura de 44 centímetros. El volumen ocupado por esta agua es el que no llegará a los toneles por ya no existir un diferencial de alturas. El valor de esta cantidad de volumen se calculó con la fórmula de volumen de un cilindro:

$$V = \pi * \frac{d^2}{4} * h = \pi * \frac{1.08^2}{4} * 0.44 = 0.403 \text{ m}^3 = 403 \text{ litros}$$

La fosa séptica, al tener una capacidad de 1100 litros, tiene disponibles para dar, la diferencia entre estos dos volúmenes:

$$V_{disponible} = 1100 - 467 = 697 \text{ litros}$$

Ya que se requiere de 590 litros aproximadamente, se tienen 107 litros demás disponibles de agua con excretas para alimentar a los toneles.

## 8. Funcionamiento del prototipo

### a. Arranque del funcionamiento

- Objetivo

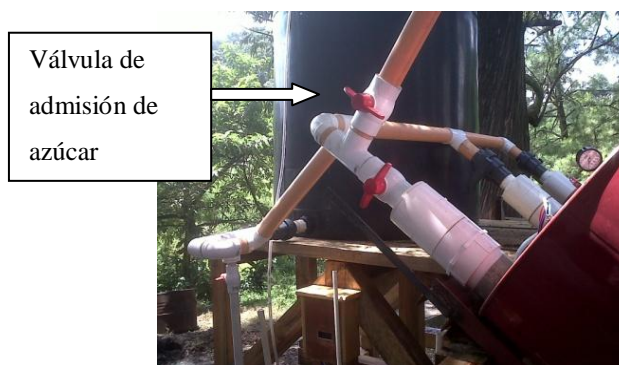
Poner el prototipo en condiciones de generación y medición. Asegurar el correcto funcionamiento de sus componentes.

- Metodología

- 1) Prueba de agua

- Cuando todavía no estaba montada la cámara de carga, pero sí la tubería PVC, se vertió agua por medio de una manguera conectada a la pileta frente al taller.
    - La manguera se introdujo en el tubo libre al que se iba a conectar la tubería faltante (Ver Ilustración 42).
    - Al estar a punto de rebalsar el agua, se empezaron a manipular las válvulas de 2'' para que el agua ingresara a los toneles.
    - Se llenó de agua cada tonel hasta la capacidad que se tenía pensado llenarlo de excretas. Se removió la tapa de 2'' de cada tonel para poder observar el nivel de agua. (Las válvulas de 4'' debían de estar cerradas).
    - Se cerraron las válvulas de 2'' y se siguió vertiendo agua hasta que la tubería estuviera completamente llena. Así se llenaron todos los elementos por los que iba a haber agua: los toneles y la tubería que conecta a ellos.
    - El agua fue liberada de la tubería hasta un día después, por medio de las válvulas de 2'' y 4''. Antes de ser liberada se inspeccionó que no hubiera ninguna fuga o grieta por donde escapara el agua.
    - Cuando ya estuvo montada la fosa séptica y cargada, y ensamblada por completo la tubería PVC (con el pegamento seco), se volvió a verter agua sólo en la tubería por medio de la válvula de admisión de azúcar.

**Ilustración 101: Válvula de admisión de azúcar**



- Al observar que no habían fugas, se liberó el agua y se procedió al llenado.

## 2) Prueba de gas

- Para hacer la prueba en la zona de baja presión se aseguró que la llave de bola de cada tonel estuviera cerrada.
- Se procedió a soplar por la boquilla de salida de la cámara de almacenamiento de gas hasta elevar a una altura considerable el émbolo.
- Se cerró la llave de salida y se mantuvo el aire adentro durante un día.
- Se inspeccionó si el émbolo perdió altura, y al no haberlo hecho, se confirma que no hay fugas en la zona de baja presión.
- La prueba de gas para la zona de alta presión se hizo hasta que se llevó a cabo el llenado del prototipo. Se cerraron las válvulas de cada tonel y se vertió el agua residual. Esta prueba falló debido a que en las tapas de los toneles había fuga.
- Fue necesario llenar otra vez la cámara de carga con la materia, extrayendo con cubeta el afluyente ingresado al tonel y vertiéndolo de regreso en la fosa séptica.
- Al hacer la segunda prueba en la zona de alta presión, con el problema de las tapas corregido, se volvió a verter la material en los toneles y al ver que la presión de los manómetros subió, se consideró aprobada la prueba de alta presión.

## 3) Llenado del prototipo

- Se aseguró que la cámara de carga estuviera completamente llena y que el émbolo de la cámara de almacenamiento de gas estuviera tarado en la altura inicial. La válvula principal (válvula PVC de 1 ½ de la fosa séptica) debía estar cerrada.
- Se vertieron 2 libras de azúcar a través de la válvula de admisión de azúcar. Ésta se cerró una vez al terminar de verter el azúcar.
- Se abrió la válvula de bola PVC del tonel que contendría azúcar.
- Se abrió la válvula principal.
- Se abrió la válvula de bola de gas del tonel que contendría azúcar.
- Se esperó a que el émbolo del gasómetro subiera una altura de 27 centímetros (equivalente a  $29.97 \approx 30$  litros según función de volumen).
- Se cerró la válvula de bola PVC de 2 ‘’, y luego la de gas.
- Se cerró la válvula principal.

- Se abrió la válvula de purga de 1'' y se drenó el agua con una cubeta.
- Se liberó el aire en el émbolo del gasómetro y se retornó a su altura inicial.
- Se repitió el proceso otras seis veces, con la excepción de que en la última vez, el gasómetro debía subir hasta 16 centímetros, (equivalente a aproximadamente 16.77 litros). El proceso de adición de azúcar termina hasta haber añadido 8 libras en total. Al terminar éste, ya no es necesario cerrar la válvula principal ni drenar el agua con la válvula de purga.
- El proceso descrito anteriormente se repitió con el tonel de control, con la excepción de la adición de azúcar. Es decir el proceso para medir nivel o volumen lleno, se repitió con este tonel.
- El último tonel no se pudo llenar de esta forma. Se destapó la cámara de carga y se sumergió un metro en una profundidad de 21.45 centímetros (altura de agua debe coincidir con este valor del metro).
- Se abrió la válvula de bola PVC del último tonel y se abrieron las válvulas de gas tanto a la salida del tonel como la del gasómetro.
- Cuando el nivel de agua en la cámara de carga llegó al valor de 0 del metro, se cerró la válvula PVC del tonel y a la vez la de gas.
- Se procedió a cerrar la llave de salida del gasómetro la válvula principal. Se vació el agua en la tubería con la válvula de purga de 1''. El contenido de la cubeta se vertió en la cámara de carga.

- Justificación y cálculos

1) *Pruebas de tubería de agua y gas.* El propósito de la prueba de agua era comprobar la inexistencia de fugas tanto en la tubería como en los toneles. También poner a prueba la estructura de madera con el peso del agua. Por esta razón es que se llenaron los toneles hasta un aproximado de donde se quería llenar de excretas, para comprobar que en condiciones normales de operación no ocurriera ningún inconveniente.

La tubería sólo conducirá fluido en el momento de llenado pues se puso una válvula de drenado de 1'' para remover el fluido de excretas en el interior al finalizar el proceso de llenado. La carga en ésta no será constante sino momentánea. A la tubería que se terminó de instalar una vez fue montada la cámara de carga tuvo que ser más deprisa debido a que se tenía que empezar a generar lo más pronto posible. Por esto, al terminar de colocar lo último de tubería,

se esperó un día para que secase y al día siguiente se le hizo la prueba de agua. Por la urgencia, no se dejó el agua durante mucho tiempo, sino bastó con que no existieran fugas en ese momento.

La prueba de tubería de gas en la zona de baja presión fue sencilla al solo consistir en soplar a través de la boquilla de salida. Se comprobó experimentalmente que un ser humano puede soplar alrededor de 2 psi de presión. Ya que la presión interna del gasómetro es de 0.335 psi, fácilmente puede un ser humano desplazar el émbolo. Con esta prueba solo se estaba asegurando de que no existiera una fuga en el gasómetro, debido a que esto causaría error en las mediciones. Por esta razón al soplar y elevar el émbolo, no se liberó este aire sino se dejó en ese estado durante un día para inspecciona que no se escape.

La prueba en la zona de alta presión consistió en llenar los toneles con agua sin dejar escapar el aire que contienen, cerrando las válvulas de salida de gas en cada tonel. El agua al ingresar en el tonel desplazaría y comprimiría el aire dentro, pues éste no tiene por donde salir. En esta prueba el aire juega el papel del biogás al ser un gas a presión dentro de la cámara de digestión. Para realizar la prueba se utilizó el agua residual en la cámara de carga para utilizar la presión ejercida por esa altura de agua, y así evaluar la tubería en una condición más fuerte. La presión ejercida por el agua proveniente de una manguera de agua no es muy alta por lo que no se podría alcanzar una presión favorable para la prueba. Así se comprobó que había fuga en las tapas de los toneles. Luego de repararse la fuga, se volvió a hacer la prueba de presión y al subir la presión en los manómetros, se consideró aprobada la tubería de gas y los toneles.

2) *Llenado de prototipo*. El llenado de dos de los tres toneles que se midió por medio de desplazamiento de aire. Se midió el volumen desplazado de aire en el gasómetro y se consideró el valor de este volumen como el que ingresó de agua. Tomando como valor total de volumen de agua por tonel como 196.5 litros, se llenó por partes porque el gasómetro no tiene la capacidad de contener tal cantidad de volumen. Se llenó de 30 en 30 litros, seis veces, para llenar 180 litros y de último, se vertió una cantidad de 16.77 centímetros para tener un total aproximado de 196.77 litros.

No se llenó con rangos de volumen más alto debido a que el gasómetro es más propenso a perder el equilibrio a mayor altura. Se comprobó experimentalmente que a menos de 30 centímetros de altura tiene una estabilidad aceptable.

El último tonel no se llenó de esta manera debido a que la presión ejercida por el peso de agua se iguala a la del gasómetro (0.335 psi), es decir se estabiliza y ya no se desplaza el émbolo. Dicha altura se calculó:

- Utilizando los valores:

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2, \rho = 1000 \text{ kg/m}^3, P = 0.335 \text{ psi} = 2309.11 \text{ Pa}$$

$$h = \frac{2309.11}{1000 * 9.81} = 0.2354 \text{ m} = 23.54 \text{ cm}$$

Esta altura de agua, dentro de la fosa séptica, equivale a un volumen de

$$V = \pi * \frac{d^2}{4} * h = \pi * \frac{1.08^2}{4} * 0.2354 = 0.21563 \text{ m}^3 = 215.63 \text{ litros}$$

Se estableció que la fosa séptica sólo puede proveer 697 litros de volumen debido a la diferencia de alturas entre el fondo de la misma y la tubería de ingreso a los toneles. Si ya se han llenado dos toneles a aproximadamente 197 litros cada uno (394 litros en total), sólo se tienen disponibles 303 litros para llenar el último tonel. Al estabilizarse la presión del agua con la de la cámara de almacenamiento de gas, no entrarán 215.63 litros.

En conclusión, si se llena el último tonel de la misma manera en que se llenaron los primeros dos, sólo entrarán 87.37 litros. Por esta razón se requirió de otro método. Lo que se hizo fue liberar la presión del gasómetro abriendo la válvula de salida, para que el sistema esté sometido solamente a presión atmosférica. La manera de controlar el volumen de agua que entraba al tonel fue midiendo en la cámara de carga la reducción de volumen. La reducción de volumen consistió prácticamente en una reducción de altura, la cual se encontró que era de 21.45 centímetros, con la fórmula de volumen de un cilindro, siendo el volumen requerido 196.5 litros (0.1965 m<sup>3</sup>):

$$h = \frac{4V}{\pi * d^2} = \frac{4 * 0.1965}{\pi * 1.08^2} = 0.21449 \text{ m} = 21.45 \text{ cm}$$

Para la adición de azúcar se debe tener en cuenta que una vez abierta la válvula principal (la de PVC de 1 ½ de la fosa séptica), la tubería está presurizada aproximadamente a 2 psi. Por eso la primera adición de azúcar es sin la tubería cargada para no tener este inconveniente. Al liberar el flujo con la válvula principal, éste intentará salir por la

válvula de admisión de azúcar, por esta razón, ésta se debe cerrar al terminar de verter el azúcar. Al abrir la válvula de admisión de 2" del tonel, el flujo toma este camino, para llenar al tonel, arrastrando el azúcar, mezclándose con la misma y homogeneizándose. Se cierra la válvula de 2" para controlar el flujo ya que se quiere llenar a cierto nivel la cámara de digestión. La presión interna de la tubería es la mencionada anteriormente de aproximadamente 2 psi (1.96 psi = 13520 Pa). Esta presión se libera con la válvula de purga de 1". Se libera toda presión en la tubería ya que de lo contrario, al abrir la válvula de admisión de azúcar, la presión se liberaría por esta región y por lo tanto esta sección de tubo dedicada para contener azúcar, estaría llena de aguas servidas y se rebalsaría. Se calcula que la presión de la tubería, si se liberara en la válvula de admisión de azúcar, elevará al agua en 1.38 m (la altura de la fosa séptica), lo cual no es deseable ya que sería perjudicial para los operarios. Por esta razón se libera la presión antes con la válvula de purga de 1" en una cubeta y simplemente se vierte el contenido de vuelta a la fosa séptica.

Una vez con la tubería drenada y sin presión, ya se puede abrir la válvula de admisión de azúcar para añadir otras 2 libras de azúcar. Según cálculos del módulo de química, son necesarias 8 libras en total y por esta razón se añade esta cantidad. Se añadió el azúcar de 2 libras en 2 libras debido a que ésta ocupa mucho volumen y también para que estuviera homogeneizada de mejor manera.

Para llenar los otros dos toneles no es necesario el procedimiento de liberar presión con la válvula de purga ni de contener la presión de la fosa séptica con la válvula principal (sólo hasta el final del proceso) ya para el llenado de estos dos toneles, no se requiere manipular la tubería más que las válvulas de admisión de 2" de cada tonel. Es decir, no hay riesgo de rebosamiento, la presión es liberada dentro de las cámaras de carga.

Por último se vacía toda el agua con la válvula de purga debido a que prácticamente habría generación de biogás dentro de la tubería, ya que está herméticamente cerrada con aguas servidas en su interior. Si se presuriza a más de 36 psi, cederá la tubería. Hay que cerciorarse que la válvula principal esté cerrada para que al purgar, no se esté drenando la fosa séptica. Por esta razón, como medida de seguridad, se retiró la palanca de accionamiento de la válvula al terminar el llenado para que de esta manera no haya peligro de que alguna persona que desconozca el funcionamiento del prototipo no pueda drenar la fosa séptica de manera accidental.

## 9. Operación

### ▪ Objetivo

Tomar muestras de la materia en las cámaras de digestión, y mediciones de volumen de biogás generado. También se debe liberar presión de las cámaras de digestión.

### ▪ Materiales

- Cubeta plástica
- Recipientes para muestra de orina
- Equipo de protección personal
- Metro
- Embudo
- Encendedor

### ▪ Metodología

#### 1) Toma de muestras de materia

- Colocar cubeta plástica a la salida del tonel de donde se obtendrá la muestra.
- Abrir la llave de 4'' en una mínima cantidad para dejar salir una pequeña cantidad de agua. Debe calcularse para llenar la mitad del recipiente para muestra de orina.
- Cerrar la válvula.
- Verter el contenido de la cubeta en el recipiente para muestra de orina, utilizando el embudo.
- Si quedó residuo de materia en la cubeta, verter de vuelta en la cámara de carga.
- Lavar la cubeta con agua.

#### 2) Medición de volumen generado

- Inspeccionar presión en manómetro.
- Asegurarse que el gasómetro esté tarado a la altura inicial.
- Abrir válvula de salida de gas correspondiente al tonel del que se quiere obtener el volumen generado.
- Medir con el metro (en centímetros), la altura entre el punto de referencia del émbolo y la marca de altura inicial.

- Cerrar válvula de salida del tonel.
- Abrir válvula de salida del gasómetro hasta que el émbolo retorne a la posición inicial. Quemar metano. Esto se hace debido a lo contaminante que es para la atmósfera.
- Ingresar altura medida en centímetros a la ecuación de volumen para obtener el valor de éste.

## 10. Finalización de funcionamiento

- Objetivo

Deshacerse de una forma no contaminante, la materia dentro de los toneles y la cámara de carga. Limpiar el equipo para su uso posterior.

- Metodología

- 1) *Descarga de material*

- Abrir llave de gas del tonel al que se le desea extraer la materia, y la llave de salida del gasómetro.
    - Abrir válvula de 4'' del tonel del que se desee extraer la materia para verter su contenido en el recipiente receptor o cámara receptora de materia, colocado a la salida de las cámaras de digestión.
    - Esperar a que se vierta el contenido en su totalidad.
    - Ingresar bomba de succión dentro del receptor y bombear hacia tanque de camión de transporte.
    - Cerrar válvula de gas del tonel, y la llave PVC de extracción.
    - Repetir el procedimiento con los siguientes dos toneles.
    - Ingresar bomba en cámara de carga para drenar el agua en su interior.

- 2) *Limpieza de prototipo*

- Remover la tapa de la fosa séptica y la de ¾'' de cada tonel.
    - Con manguera o compresor, verter agua a presión hasta remover la materia en sus paredes.
    - Abrir válvula de admisión de azúcar y verter agua para limpiar tubería.

- En el momento que el agua empiece a rebalsar, abrir la válvula de admisión de PVC de cada tonel y esperar que fluya entre 10 y 15 segundos, luego cerrar. Para el último tonel, cerrar válvula hasta que ya no exista flujo de agua.
- Drenar agua en cubeta por medio de las válvulas de extracción PVC de 4'' de los toneles y la válvula de drenado de 1''.

- Justificación

1) *Descarga de material.* La descarga de material consiste simplemente en dejar salir las aguas residuales de las cámaras de digestión. Se debe abrir la válvula del gasómetro y la de salida de gas de cada tonel ya que al liberar el agua se crea una succión dentro del tonel. Al abrir las válvulas de gas, se presuriza el tonel a presión atmosférica.

La cámara receptora de efluente se planea fabricar un cajón de madera que ocupe 1 x 2 metros cuadrados y tenga 20 centímetros de altura para tener una capacidad de 400 litros.

$$V_{\text{cámara receptora}} = 1 \times 2 \times 0.2 = 0.4 \text{ m}^3 = 400 \text{ litros}$$

Este volumen puede contener la cantidad de un tonel completamente lleno (262 litros) y tiene una incertidumbre extra debido a que no se saben las dimensiones de la bomba, cuyo volumen va a desplazar el del agua al sumergirla. Para hacerla impermeable se le colocará nylon en su interior de esta manera contendrá el agua.

La cámara receptora de efluente se piensa colocar a lo largo de la salida de los 3 toneles.

**Ilustración 102: Ubicación de cámara receptora de efluente**



Para la extracción del agua con bomba de succión se debe contratar una empresa de limpieza de fosas sépticas para deshacerse de la materia de una forma limpia.

No se consideró hacer patio de secado por varias razones. La primera es que la materia no estará degradada por completo al salir del Biodigestor, por lo que al secarla, no será un producto utilizable para abono. Debido a que el prototipo no estaba enfocado a tratamiento de agua sino a la generación de metano, el agua tampoco se puede considerar limpia o tratada. La materia al no estar completamente degradada, desprenderá olor y al estar en los alrededores del taller de metal mecánica, el olor afectará a las personas que trabajen en el mismo. Otra razón es que en el lugar donde se colocó el prototipo, no hay mucha incidencia de la luz del sol debido a que está rodeado de árboles frondosos, por lo que tardaría mucho tiempo en secarse la materia si saliera lo suficientemente degradada. No se puede pasar a compost la materia del efluente debido a que está mezclado con agua y la humedad no permite que exista una actividad microbiana capaz de descomponer los desechos orgánicos.

2) *Limpieza del prototipo.* Para la limpieza no es necesario un gran caudal de agua, sino presión. Por esta razón al drenar el agua no se tendrá un gran volumen, por lo menos comparado al volumen original con el que se generó. Por esta razón se puede extraer con cubeta el agua de limpieza. Esta agua por estar contaminada, no se puede verter en el drenaje por lo que será desechada en la fosa séptica y ahí será almacenada.

Para la limpieza de la tubería de agua se vertió en la válvula de admisión de azúcar debido a que no se tiene otra forma de ingresar agua a la tubería sin utilizar una gran cantidad. Al verter agua por la válvula, el agua llenará toda la tubería debido a que la salida de la válvula de admisión de azúcar está a una mayor altura, por lo que el agua antes de rebalsar, debe de ocupar todo el espacio de la tubería. Se irán abriendo las válvulas de cada tonel durante un tiempo determinado para que el flujo de agua limpie cada segmento de tubería. Por último se abrirá la válvula de drenado de 1'' para vaciar por completo toda el agua que aún no se ha drenado, incluyendo la de la fosa séptica.

## **11. Mantenimiento**

El prototipo al no tener maquinaria rotativa, ni motores conlleva un mantenimiento relativamente sencillo y de bajo costo debido a que se cuenta equipo rústico.

a. **Mantenimiento preventivo.** El elemento que requiere principalmente de un mantenimiento preventivo es la estructura de madera. Debido a que fue tratada con barniz marino, éste puede caerse con el paso del tiempo. Según proveedor de madera, es recomendable aplicar una capa de barniz cada 6 meses. En época de invierno es recomendable inspeccionar la aparición de hongos, ya que esta es clara señal que necesita ser tratada de nuevo.

La tubería PVC y de gas, la fosa séptica y el gasómetro prácticamente no requieren de ninguna clase de mantenimiento preventivo más que una limpieza al final de su utilización y una prueba de presión al inicio de la misma.

Los toneles están propensos a corrosión, sin embargo están protegidos con 6 capas de pintura anticorrosiva en su interior, por lo que no requieren tampoco de un mantenimiento preventivo. Al igual que la mayoría de los otros elementos, sólo requiere de una limpieza al final del uso del prototipo.

b. **Mantenimiento correctivo y de avería.** A continuación se presentan los elementos del prototipo y los posibles problemas que pueden causar un mantenimiento correctivo y de avería. Se recomienda un chequeo mensual en busca de los siguientes posibles problemas:

**Tabla 32: Parámetros de mantenimiento**

Elemento	Inspeccionar
Cámaras de digestión	Fugas, grietas, corrosión, deformaciones.
Tubería de agua	Fugas, grietas, obstrucciones.
Tubería de gas	Fugas, obstrucciones.
Estructura de madera	Deformación, degradación ambiental.
Gasómetro	Fuga, obstrucción.
Cámara de carga	Fuga, obstrucción, grietas, deformaciones.

La solución a cada problema depende de la naturaleza del mismo. Para una fuga la solución más viable es presurizar el elemento en donde se encuentre el problema. La manera de presurizarlo dependerá de las características del elemento. Si es de alta presión como los toneles o tubería de gas, puede ser necesario el uso de un compresor a través de las llaves de salida. La ventaja de la tubería de gas es que fácilmente puede desmontarse. Una vez presurizado el elemento, se debe proceder a encontrar la fuga vertiendo agua. Luego acorde a la naturaleza de

la fuga se decide de qué forma arreglarlo. En elementos de agua puede hacerse una prueba de presión y encontrar la fuga.

Una obstrucción puede requerir de una solución más compleja como desarmar el sistema que tenga la avería hasta encontrarla o puede arreglarse simplemente aplicando presión al sistema obstruido, aunque si ésta es grande, será necesaria la desensamblada.

Si se presenta corrosión, se debe hacer la evaluación si removerla o si el elemento o tonel ya no puede seguirse utilizando. Si la corrosión está concentrada en un punto, puede removerse esta sección y adherir otra.

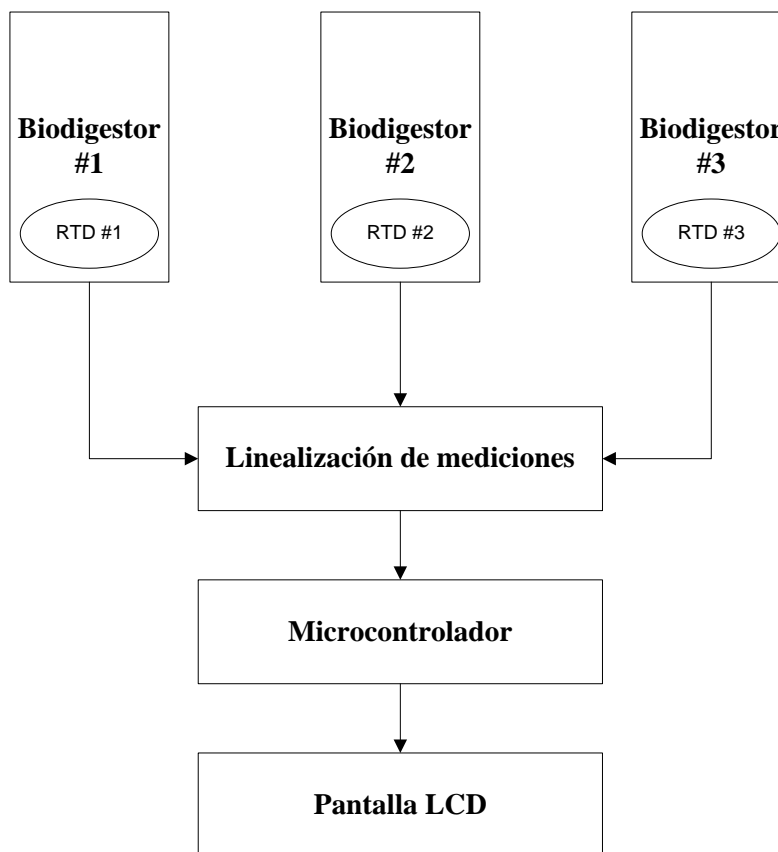
Las grietas son un problema que debe solucionarse inmediatamente debido a que se expanden. Depende del estado de la grieta, en toneles puede ser soldado y en tubería PVC sellado con pegamento para PVC. Si ésta es de grandes dimensiones, se puede utilizar algún material de aporte para cerrar la grieta. Si es en la madera, debe considerarse seriamente el cambio de la estructura y hacerlo lo más pronto posible. Sería necesario el desensamble de la tubería PVC y de gas. Una vez hecho esto, sólo se requiere de remover la cámara de carga y de digestión.

Las deformaciones deben evaluarse ya que si se da por la naturaleza del material, no se requiere de reparación. Debe evaluarse si el elemento sigue cumpliendo con su función y puede seguirlo haciendo, sin importar su deformación. De otra manera, si el elemento ha llegado a su límite plástico y ya no cumple su objetivo, debe considerarse el cambio. La ventaja de este prototipo es que sus componentes son relativamente de bajo costo debido a lo simples que son.

## C. Módulo de Mecatrónica

1. **Medición y calibración de temperatura.** Para la medición de la temperatura dentro de los Biodigestores se utilizaron tres sensores de temperatura RTD, las mediciones realizadas por estos sensores fueron desplegadas en una pantalla LCD en el mando de control. En la Ilustración 91 se puede observar un diagrama del proceso utilizado para el despliegue de las mediciones de temperatura en la LCD.

Ilustración 103: Diagrama de control de temperatura

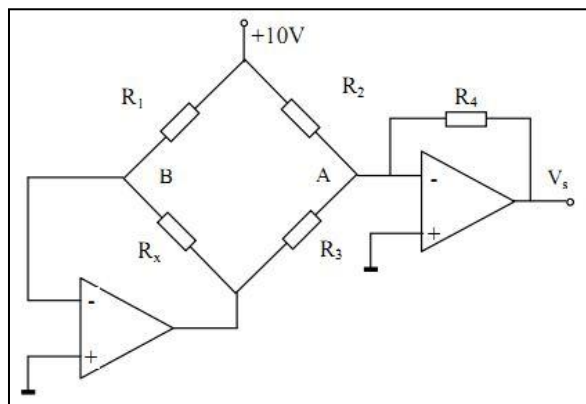


El tipo de conexión utilizado para la PT100 (RTD) fue el de conexión a 2 hilos, para evitar los errores en la medición, se utilizó un cable relativamente grueso con diámetro equivalente a un cable 12 AWG y con una longitud de 3 metros para la RTD más distante al mando de control, el error inducido por este cable es menor a 0.1 °C.

a. **Calibración y linealización.** Para la linealización de la medición de temperatura (entre 0 - 100 °C) en una señal entre 0 y 5 Vdc se utilizó el circuito de la Figura 13 con las siguientes características:

- Rx es la PT100 utilizada con  $\alpha = 0.385 \Omega / ^\circ\text{C}$
- Los Amplificadores Operacionales (A.O.) son ideales
- La alimentación de los A.O. es de  $\pm 12\text{Vdc}$
- $R1 = R2 = 10 \text{ k}\Omega$
- $R3 = 100 \Omega$
- $R4 = 20 \text{ k}\Omega$

Ilustración 104 - Circuito linealizador de Pt100



Para la calibración de los sensores de temperatura se realizaron una serie de pasos para encontrar el error en la medición: utilizando el circuito de la Ilustración 92 y variando el valor de la resistencia  $R_x$  por medio de una resistencia fija de  $100 \Omega$  y un potenciómetro de precisión de  $20 \Omega$  se midieron los voltajes de salida  $V_s$  correspondientes. Se utilizó la medición de resistencia de un multímetro Fluke 115 como valor teórico.

Tabla 33: Linealización de Pt100

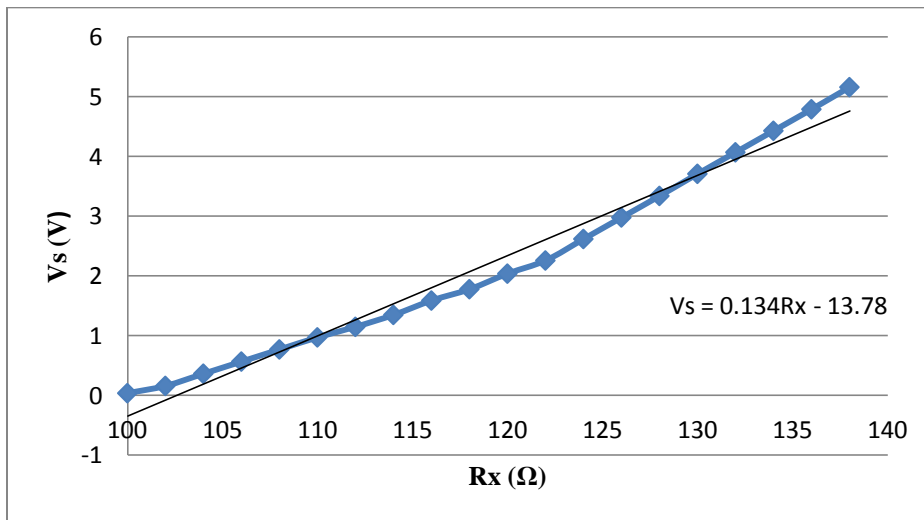
Valor $R_x$ Teórico ( $\Omega$ )	$V_s$ (V)
100	0.04
102	0.162
104	0.366
106	0.569
108	0.772
110	0.974
112	1.152
114	1.353
116	1.592
118	1.783
120	2.044
122	2.265
124	2.626
126	2.987
128	3.341
130	3.712
132	4.074
134	4.433
136	4.798
138	5.167

En la Gráfica 4 se puede observar la gráfica de dispersión de Rx contra Vs, a esta gráfica se le aplicó una regresión lineal para determinar la ecuación que relaciona el valor de Rx con el voltaje de salida Vs, que es:

$$V_s = 0.134R_x - 13.78$$

**Ecuación 26: Vs vs Rx**

**Gráfica 4: Linealización de Rx ( $\Omega$ ) vs Vs (V)**



A los voltajes obtenidos de la linealización de la PT100 se les aplicó una conversión analógica/digital de 10 BIT, en la Ecuación 27 se observa la linealización.

$$ADC = 204.5V_s + 6.346$$

**Ecuación 27: Conversión ADC vs Vs**

Conociendo la Ecuación 25 se puede encontrar la función inversa que relaciona el resultado de la conversión ADC con el voltaje Vs de la linealización, en la Ecuación 28 se muestra la relación entre estos:

$$V_s = (ADC - 6.346) / 204.5$$

**Ecuación 28: Vs vs Conversión ADC**

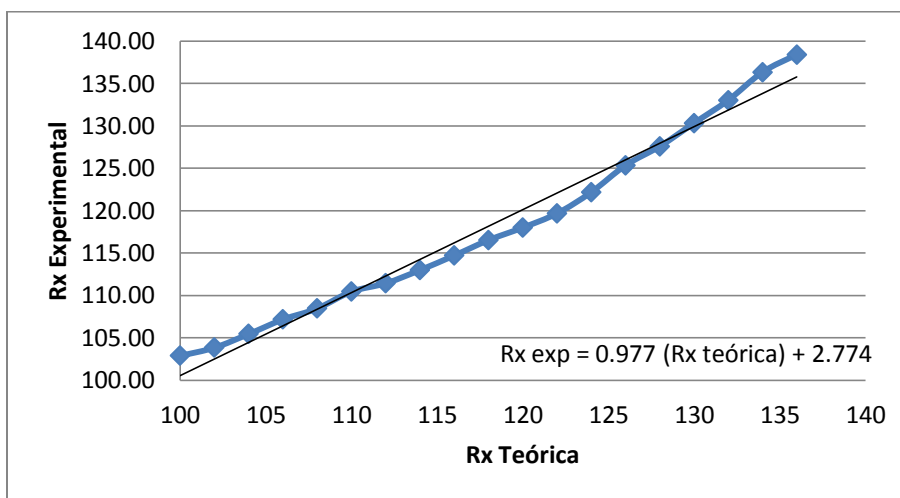
Haciendo uso de la Ecuación 26 es posible encontrar la relación entre  $V_s$  y el valor de resistencia  $R_x$  experimental correspondiente.

$$R_x (\text{experimental}) = (V_s + 13.78) / 0.134$$

**Ecuación 29:  $R_x$  experimental vs  $V_s$**

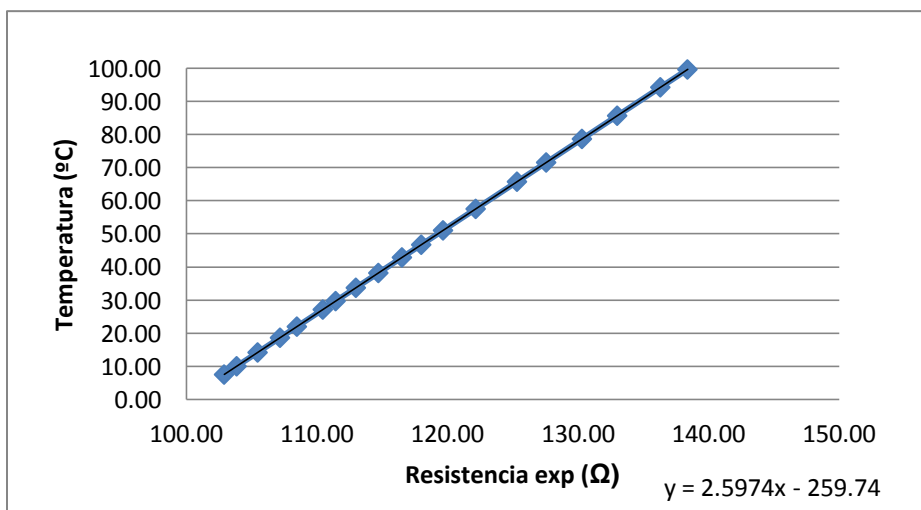
En la Gráfica 5 se observa la relación entre el valor de  $R_x$  teórico vs el valor de  $R_x$  experimental obtenido luego de las linealizaciones.

**Gráfica 5: Error entre  $R_x$  teórica vs  $R_x$  experimental**



Haciendo uso de la Ecuación 21 que relaciona el valor de resistencia de la Pt100 con la medición de la temperatura en grados centígrados se obtuvo el gráfico de la Figura 16.

**Gráfica 6: Relación  $R_x$  vs temperatura**

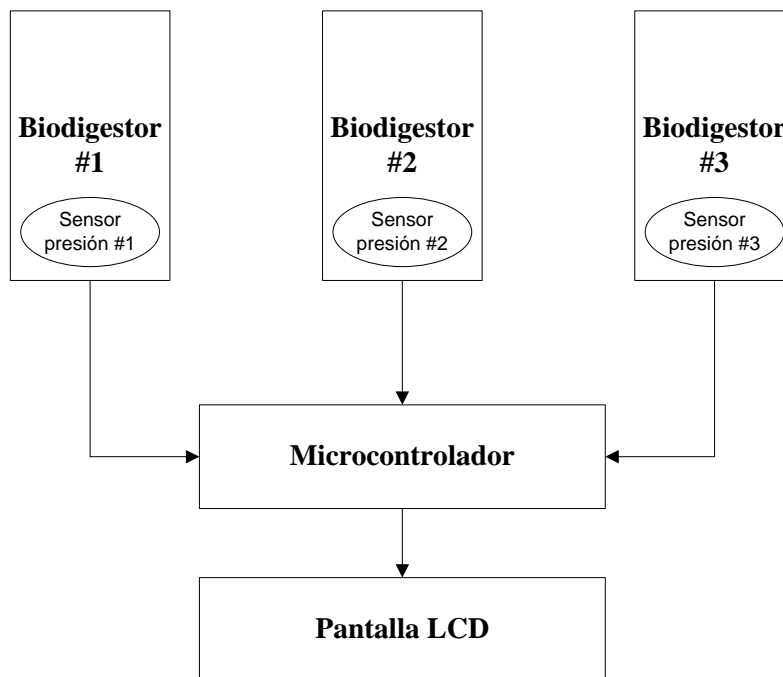


Todas las relaciones descritas desde la Ecuación 26 fueron implementadas en la programación del microcontrolador para lograr la calibración y el despliegue de la medición de temperatura.

**2. Medición y calibración de presión.** Para la medición de la presión dentro de los Biodigestores se utilizaron tres sensores de presión marca Sensata, estos sensores tienen como salida una señal de voltaje D.C. (entre 0.5 y 4.5 D.C.) proporcional a la presión sensada. Las mediciones realizadas por estos sensores son desplegadas en una pantalla LCD en el mando de control.

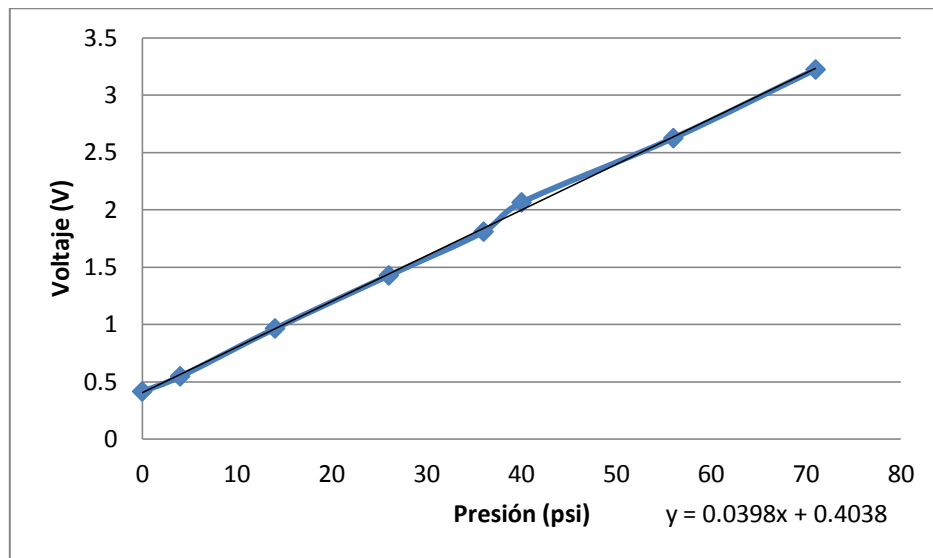
En la Ilustración 105 se puede observar un diagrama del proceso utilizado para el despliegue de las mediciones de presión en la LCD.

**Ilustración 105: Diagrama control de presión**



Los sensores de presión se conectaron por medio de una manguera de vinyl a la salida de un compresor de aire y por medio del regulador se varió la presión expuesta a los sensores en la manguera. Midiendo el voltaje de salida de los sensores y graficando contra la presión obtenida en el manómetro del compresor de aire se obtuvo la Gráfica 7.

Gráfica 7: Relación presión vs voltaje



A los voltajes obtenidos de la linealización de los sensores de presión se les aplico una conversión analógica/digital de 10 BIT, en la Ecuación 30 se observa la linealización.

$$ADC = 204.8 * V + 6E-14$$

Ecuación 30: Relación conversión ADC de presión vs voltaje

Utilizando la Ecuación 28 se puede encontrar la función inversa que relaciona el resultado de la conversión ADC con el voltaje V de la linealización de presión, en la Ecuación #8 se muestra la relación:

$$V = (ADC - 6E-14) / 204.8$$

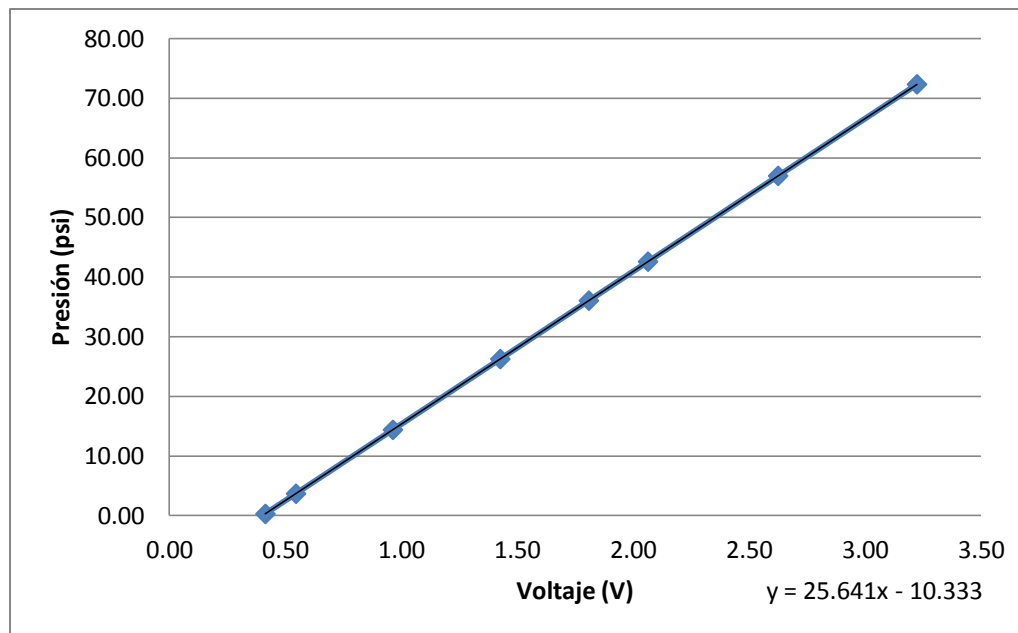
Ecuación 31: Relación voltaje vs conversión ADC

Utilizando la Gráfica 7 se obtuvo la Ecuación #9 que relaciona el valor de la presión sensada con el resultado de la linealización de presión.

$$P = 25.64 * V - 10.33$$

Ecuación 32: Relación voltaje vs presión

Gráfica 8: Linealización voltaje vs presión



Las relaciones descritas desde en la Ecuación 29 y en la Ecuación 30 fueron implementadas en la programación del microcontrolador para lograr la calibración y el despliegue de las mediciones de presión en el mando de control.

**3. Control de temperatura en Biodigestor #3.** Para realizar el cálculo de la cantidad de energía necesaria para aumentar la temperatura en el Biodigestor se supuso que las características de las aguas residuales eran muy parecidas a las del agua. La cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura del Biodigestor desde la temperatura inicial ( $T_i$ ) hasta la temperatura deseada ( $T_f$ ), viene dada por la Ecuación 33.

$$Q_T = Q_{agua} + Q_{acero} + Q_{aire}$$

**Ecuación 33: Cantidad de energía necesaria para aumento de temperatura**

Donde:

$$Q_{agua} = m_{agua} * ce_{agua} * (T_f - T_i)$$

**Ecuación 34: Energía necesaria para aumentar temperatura del agua**

$$Q_{acero} = m_{acero} * c_{eacero} * (T_f - T_i)$$

**Ecuación 35: Energía necesaria para aumentar temperatura de acero**

$$Q_{aire} = m_{aire} * c_{v_{aire}} * (T_f - T_i)$$

**Ecuación 36: Energía necesaria para aumentar temperatura del aire**

Utilizando los datos del Cuadro 7 y sustituyendo en la Ecuación 31, la cantidad de energía necesaria (kJ) para elevar la temperatura del Biodigestor #3 hasta una determinada temperatura final  $T_f$  (°C) viene dada por la Ecuación 37.

**Tabla 34: Propiedades de los elementos del Biodigestor #3**

Propiedades	Agua	Aire	Acero AISI 1008
Masa (Kg)	196.5	0.077	18.2
Calor específico (KJ/Kg* °C)	4.18	0.718	0.481
Temperatura inicial	25	25	25

$$Q_T = 830 * T_f - 20,750$$

**Ecuación 37: Energía requerida vs temperatura final**

Para lograr el aumento de temperatura en el Biodigestor #3 se utilizaron tres resistencias eléctricas conectadas en paralelo las cuales rodeaban al Biodigestor. Para evitar la pérdida de calor hacia el ambiente se utilizó fibra de vidrio como aislante térmico.

**Tabla 35: Propiedades resistencias eléctricas**

Propiedad	Valor
Resistencia #1	25 Ω
Resistencia #2	25 Ω
Resistencia #3	25 Ω
Voltaje	26 Vrms
Corriente	3.12 A
Potencia	81.12 W (J/s)

La cantidad de horas aproximadas requeridas para aumentar la temperatura del Biodigestor #3 hasta una temperatura final  $T_f$  viene dada por la Ecuación 38.

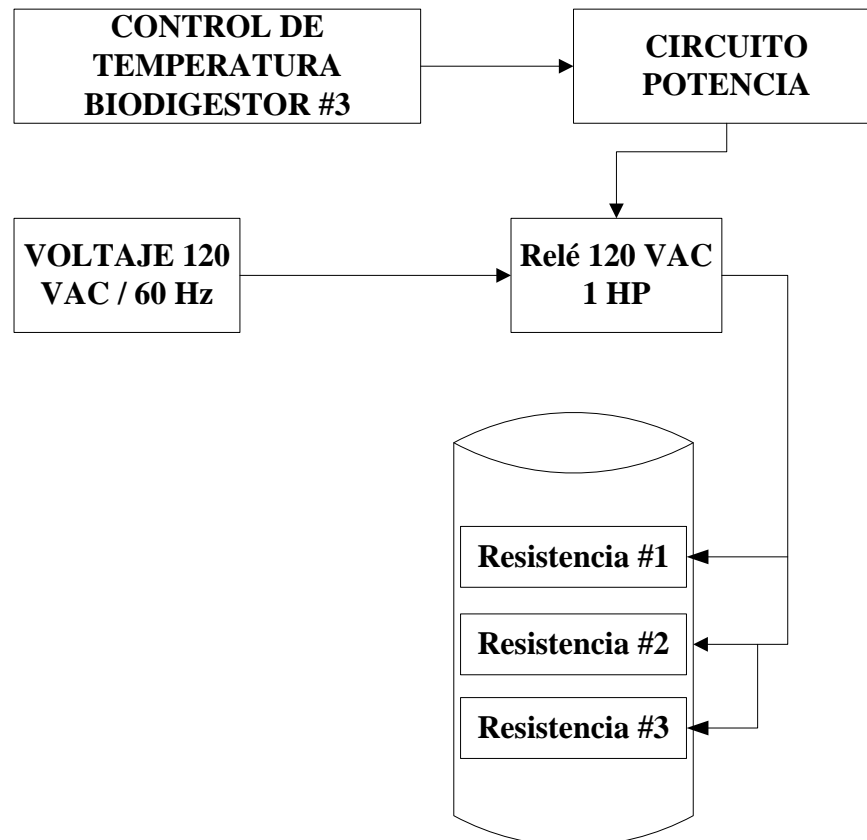
$$t = \left( \frac{830 * T_f - 20,750}{81.12 J/s} \right) * \left( \frac{1 h}{3,600 s} \right)$$

**Ecuación 38: Horas necesarias para aumento de temperatura**

Utilizando la Ecuación 36, la cantidad de horas aproximadas requeridas para elevar la temperatura del Biodigestor #3 a 40 °C es:

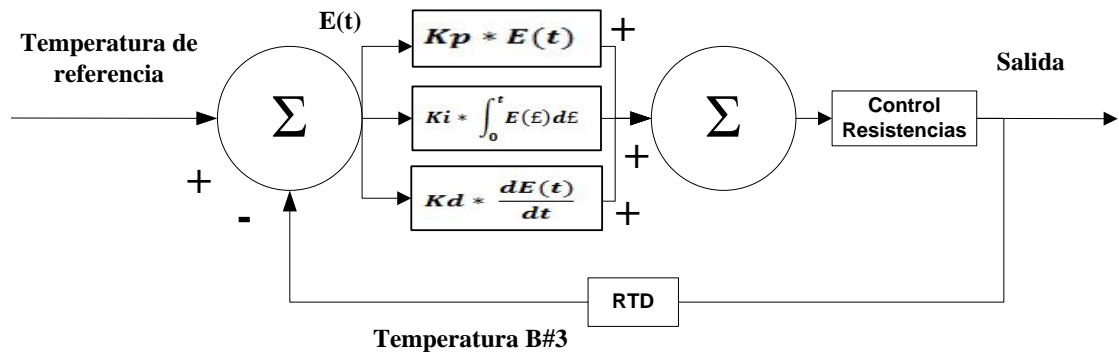
$$t = \left( \frac{(830 * 40 - 20,750) kJ}{81.12 \frac{J}{s}} \right) * \left( \frac{1 h}{3,600 s} \right) = 43 \text{ horas}$$

**Ilustración 106: Conexiones control de temperatura**



Para poseer el control de la temperatura del Biodigestor #3 se utilizó un control PID digital (proporcional, integral, derivativo) implementado en el microcontrolador como mecanismo de control por retroalimentación. En la Ilustración 94 se observa un diagrama de bloques del control de la temperatura.

Ilustración 107: Diagrama de bloques control de temperatura

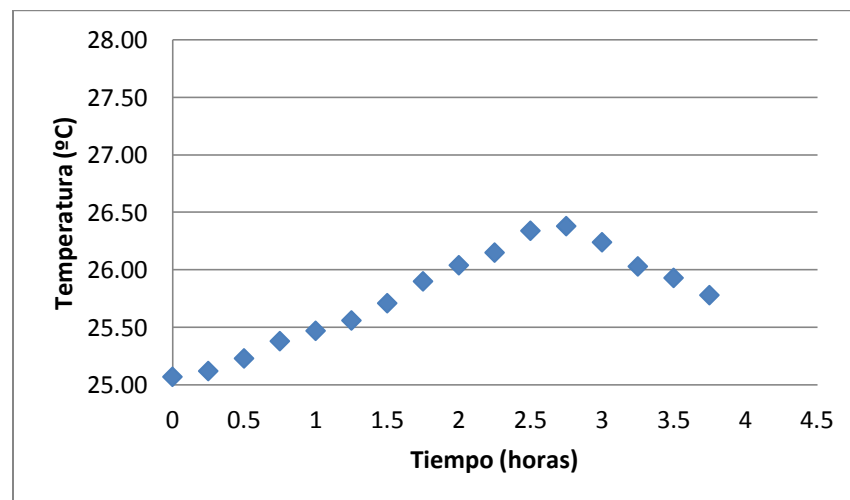


Los valores seleccionados para el control PID fueron:

- $K = 2.5$
- $I = 0.1$
- $D = 0.2$

Implementando el control PID en el microcontrolador y graficando la temperatura del Biodigestor #3 contra el tiempo se obtuvo la Gráfica 9, esta gráfica muestra como varía la temperatura en relación al tiempo al ingresar una temperatura de referencia de 26 °C.

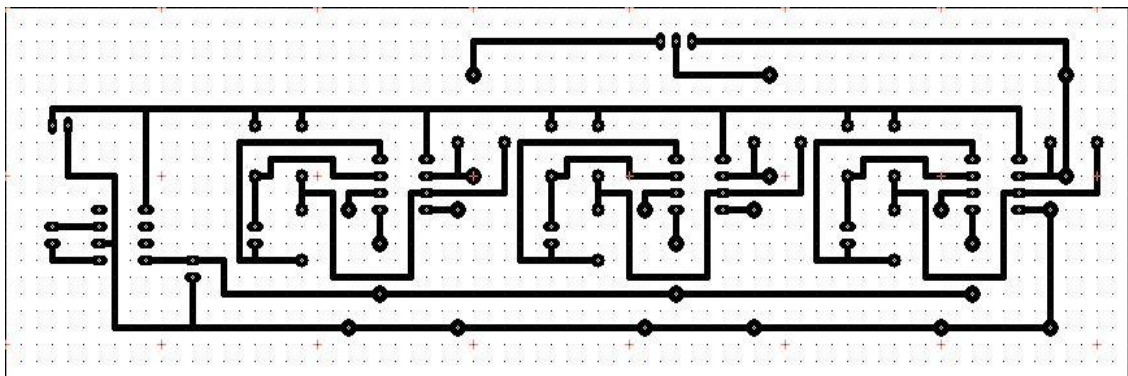
Gráfica 9 - Salida del controlador de temperatura



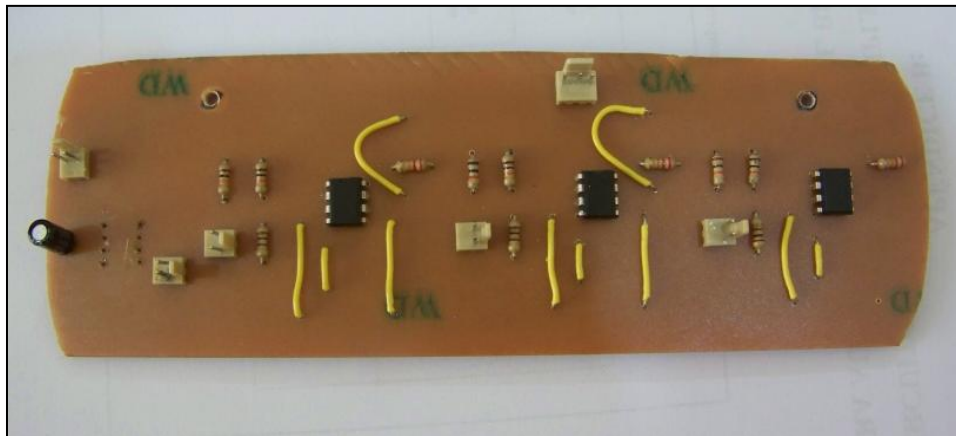
**4. Diseño e implementación de circuitos electrónicos.** El diseño de los circuitos electrónicos se dividió en cuatro circuitos principales, los diseños de los circuitos fueron realizados con ayuda del software PCB Wizard.

a. **Linealización de las mediciones de las Pt100.** Utilizando el diagrama del circuito descrito en la Ilustración 92 se procedió a realizar el diseño para la linealización de las tres mediciones de las Pt100. En la Ilustración 96 se puede observar el diseño de PCB del circuito linealizador.

**Ilustración 108: Diseño PCB para linealización de las Pt100**



**Ilustración 109: Implementación circuito linealizador de las Pt100**



b. **Circuito controlador de la temperatura en Biodigestor #3.** Para controlar la alimentación de las resistencias eléctricas utilizadas para el calentamiento del Biodigestor #3 se diseñó un circuito amplificador conectado a un relé de 5 VDC el cual posee como entrada la señal del microcontrolador. En la Ilustración 98 se puede observar el diagrama esquemático de este circuito.

Ilustración 110: Diagrama esquemático circuito controlador

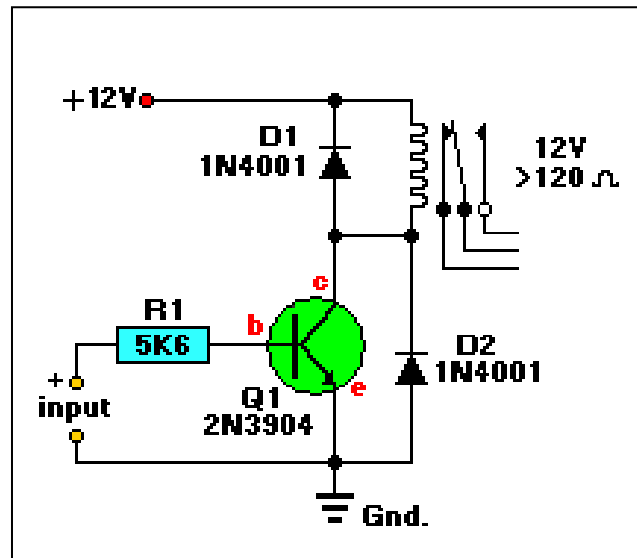


Ilustración 111: Diseño PCB circuito controlador

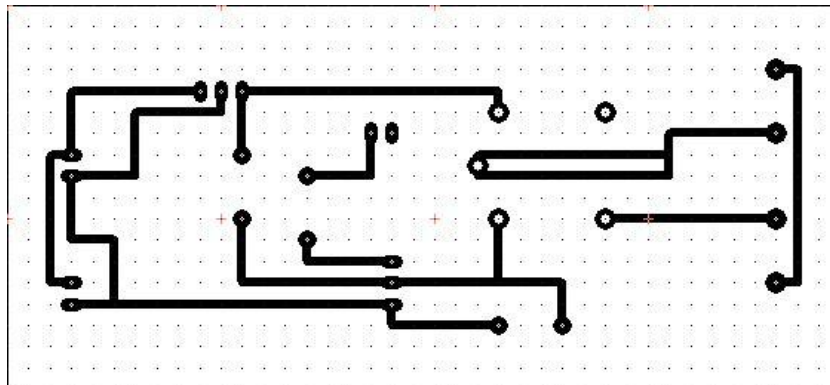
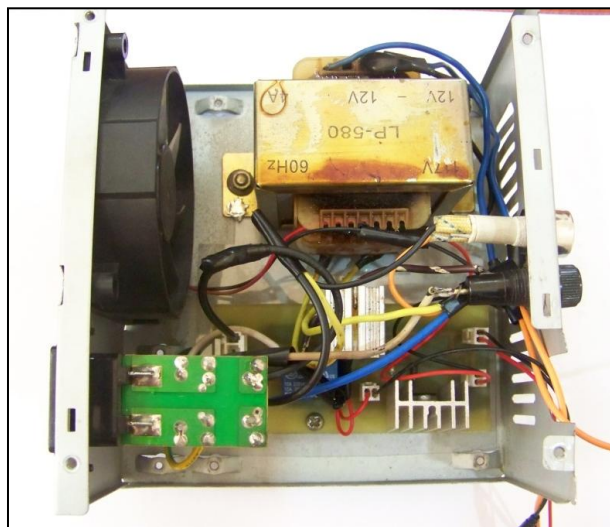


Ilustración 112: Implementación circuito controlador de temperatura



c. **Circuito principal para despliegue de mediciones en LCD.** El circuito principal consta de un microcontrolador PIC18F4620 con un oscilador interno de 8 Mhz, una serie de tres botones para programar la temperatura de referencia para el Biodigestor #3, una pantalla LCD de 2 \* 16 caracteres, un potenciómetro de 5 k $\Omega$  para graduar el contraste de la LCD y las conexiones necesarias para la alimentación del circuito principal, sensores de presión y circuito de almacenamiento de datos en memoria SD. En la Ilustración 101 se observa el diseño de PCB para el circuito principal.

Ilustración 113: Diseño PCB circuito controlador

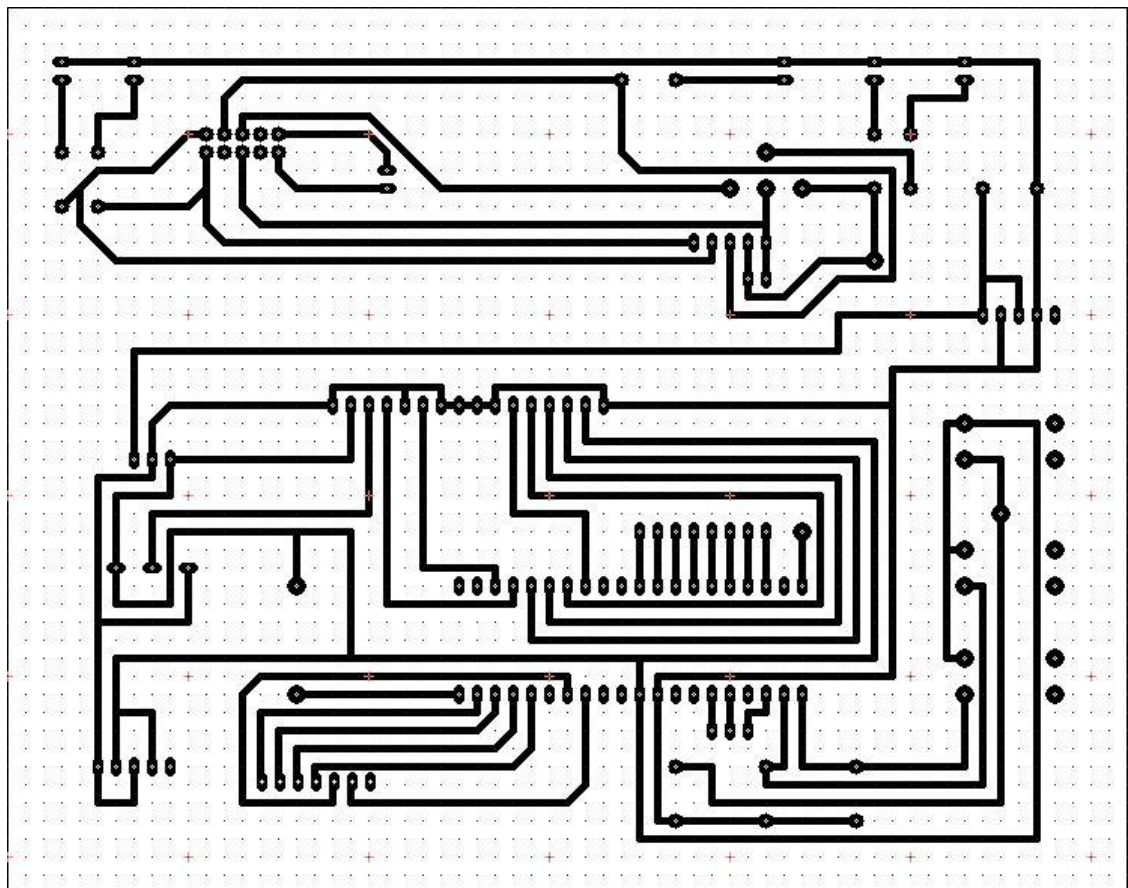
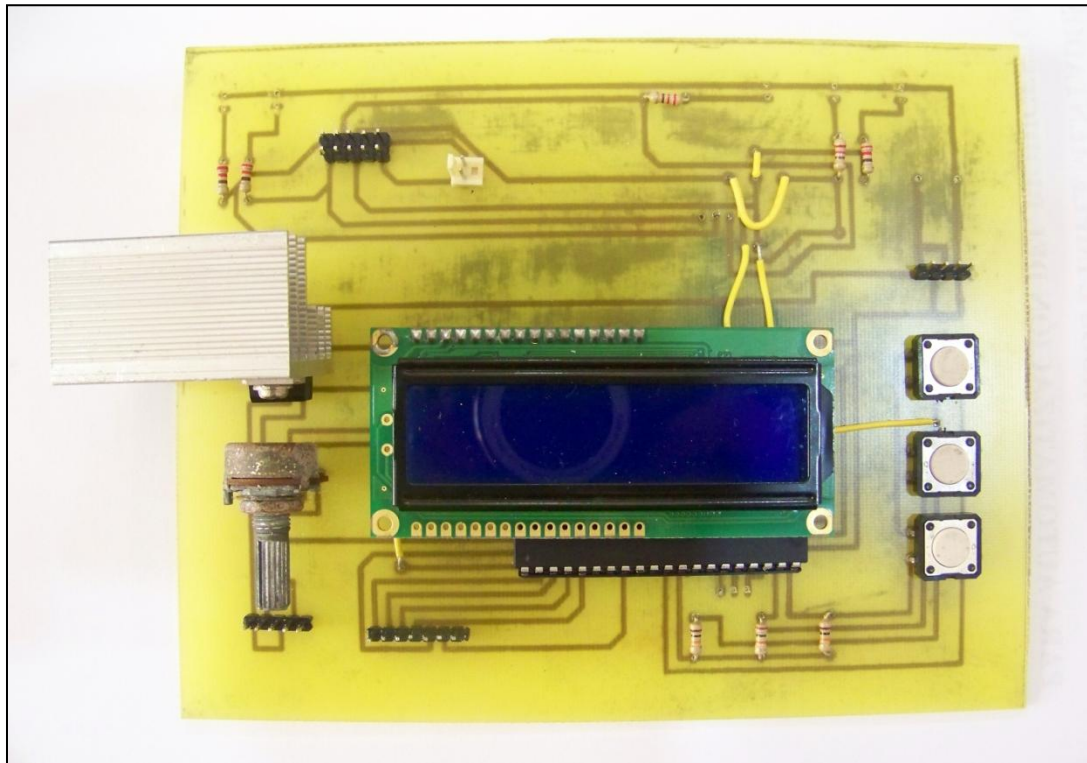


Ilustración 114: Implementación circuito controlador



d. **Circuito para almacenamiento de datos en memoria SD.** Para el almacenamiento de datos de temperatura y presión en la memoria SD se utilizó el complemento de almacenamiento de Mikroe para el programador EasyPic6. El circuito de almacenamiento se encuentra conectado al circuito principal por medio de un conector IDC10. Este circuito utiliza una interfaz de comunicación serial sincrónica (SPI). En la Ilustración 103 se observa el circuito de auxiliar de almacenamiento.

Ilustración 115: Circuito para almacenamiento de mediciones en memoria SD



## D. Módulo de control de calidad y seguridad industrial:

### 1. Análisis de seguridad industrial del proceso de biodigestión

a. **Equipo de protección necesario para trabajar con aguas servidas.** Es necesario utilizar equipo de protección al manipular aguas negras o servidas ya que de esta manera se evita la contaminación y las enfermedades que se pueden producir al entrar en contacto con ellas. Este equipo se debe utilizar cada vez y durante todo el tiempo que se esté expuesto a las aguas residuales para poder manipularlas de manera segura y disminuir las probabilidades de padecer de una afección a la salud causada por la interacción con dichas aguas.

b. **Vestuario.** Al llegar a la fosa séptica o prototipo de Biodigestor, es necesario que el usuario utilice ropa cómoda y que le dé flexibilidad (preferiblemente hecha de algodón) y un overol (de algodón también). Si no se cuenta con un overol, se puede usar una bata de laboratorio de mangas largas cerrada. El objetivo de usar una bata u overol es cubrir la mayor superficie de piel posible para evitar o minimizar cualquier contacto de las aguas residuales con la piel y por lo tanto, cualquier contaminación directa.

El calzado apropiado para este tipo de situaciones son las botas; es necesario utilizar botas de plástico grueso como mínimo, pero puede ser un calzado más profesional como lo son las botas con punta reforzada de acero. Éstas resultan importantes ya que protegen los pies de cualquier contacto con el agua contaminada además de que ofrecen una mayor seguridad al caminar en el terreno puesto que poseen suelas rugosas que ayudan a evitar caídas al dar una mejor tracción y adherencia.

Es importante utilizar un casco ya que este evita que haya algún contacto con el cuero cabelludo o el cabello mismo, en el caso de que se tenga el pelo largo, se puede utilizar para salvaguardarlo dentro del mismo utilizando una redecilla. El casco también tiene como función evitar lesiones que se puedan producir en la cabeza por resbalones o golpes contra superficies duras (riesgos mecánicos).

c. **Accesorios.** Como parte del equipo de protección se deben de utilizar accesorios que protejan las vías respiratorias y la boca, por lo que se recomienda usar una mascarilla que cubra tanto la boca como la nariz. El fin de utilizar una mascarilla es evitar inhalar olores poco agradables, gases que puedan ser tóxicos y evitar el contacto de las aguas residuales con la cara en caso de que se salpique la materia.

Otro accesorio que es necesario utilizar para proteger la piel y que no se encuentre expuesta a una posible contaminación son los guantes, estos son de vital importancia ya que las manos son una de las partes del cuerpo que se encuentra más expuesta y de las que más se utilizan para trabajar con aguas residuales. Para asegurar una protección óptima, se recomienda utilizar guantes de látex o de PVC cuando se esté trabajando directamente con las aguas negras; ahora bien, también se pueden utilizar guantes de látex natural para manipular con mayor facilidad las muestras o para hacer trabajo que requiera de mayor psicomotricidad fina.

Es necesario utilizar lentes de seguridad para prevenir que cualquier sustancia no deseada salpique y entre en contacto con los ojos, ya que estas aguas resultan irritantes, infecciosas y pueden llegar a causar alguna enfermedad. Estos lentes pueden estar fabricados de policarbonato o plástico y en caso óptimo contienen protectores laterales para maximizar el área protegida por los lentes.

**2. Riesgos.** Como la mayoría de actividades realizadas por los seres humanos, la operación de un Biodigestor trae riesgos asociados que se deben de conocer para poder disminuir el riesgo de un accidente. Los riesgos asociados al biogás, las aguas residuales y al prototipo de Biodigestor se pueden dividir en cuatro grandes bloques:

- Riesgos biológicos
- Riesgos mecánicos
- Riesgos de explosión
- Riesgos eléctricos

Al trabajar con biogás, se debe de tener en cuenta que el gas que se encuentra en mayor porcentaje en él es el metano, por lo que existe riesgo de explosión. Los límites de inflamabilidad del metano cuando se encuentra mezclado con los demás componentes del biogás son de 9% a 22% en proporción de volumen con el aire, que resultan en un alto riesgo de explosión en un espacio cerrado, por lo que hay que tener precaución de no crear una chispa bajo estas condiciones ya que probablemente resulte en una explosión.

Otro riesgo potencial al trabajar con biogás es la intoxicación, que aunque sea más amenazante para trabajos que se lleven a cabo en cuartos cerrados, es importante tomar en cuenta siempre que se trabaje con este gas. Si se está trabajando en un lugar cerrado con biogás, existe un mayor riesgo de intoxicación ya que la mezcla cuenta con un porcentaje de entre 30% y 45% de dióxido de carbono, aumentando la densidad del biogás más que la del aire resultando en una disminución del oxígeno disponible derivando en dificultades respiratorias.

a. **Riesgos biológicos.** Al trabajar con aguas residuales de una fosa séptica, existe el riesgo de contraer alguna enfermedad por entrar en contacto con dichas aguas. Estas enfermedades se pueden contagiar a través de parásitos, bacterias o virus que viven en éstas aguas.

Cuando se manipula este tipo de materia prima, es importante utilizar indumentaria para protegerse y evitar el contacto directo con éstas ya que pueden acarrear una serie de microorganismos que son dañinos para los seres humanos. A continuación se enumeran algunos:

1) **Bacterias.** Las bacterias que comúnmente se encuentran en las aguas residuales son la *shigella*, *salmonella typhi*, *salmonella*, *vibrio cholerae*, *escherichia coli*, *yersinia enterocolitica* y *leptospira spp.*, entre otras. Usualmente la bacteria que se encuentra con más frecuencia en aguas residuales es la *Salmonella*, que produce fiebres entéricas, las septicemias y la gastroenteritis aguda. Entre las enfermedades causadas por las bacterias presentes en las aguas residuales se puede mencionar fiebre tifoidea, cólera y gastroenteritis que producen síntomas como la diarrea, fiebre, calambres, vómitos y dolor de cabeza.

2) **Parásitos.** Dentro de las aguas servidas se encuentran también una serie de parásitos entre los que cabe mencionar *Entamoeba histolytica*, *Giardia lamblia*, *Balantidium coli*, *A. scaris lumbricoides*, *Ancylostoma duodenale*, *Necator americanus*, *Ancylostoma spp.*, *Strongyloides stercoralis*, *Trichuris trichiura*, *Enterobius vermicularis* y *Echinococcus granulosus*. Cabe mencionar que el parásito más peligroso entre los mencionados anteriormente es el *Entamoeba histolytica*, que es el causante de la disentería amébrica y de la hepatitis amébrica. Otras enfermedades causadas por los parásitos enumerados con anterioridad son Anquilostomiasis, Necatoriasis, Larva migrante cutánea, Estrongiloïdiosis, Tricuriasis, Teniasis, Enterobiasis e Hidatidosis. Dentro de los síntomas producidos por dichas enfermedades se encuentran los trastornos intestinales, flatulencias, náusea, diarrea y malestar general.

3) **Virus.** El virus asociado por excelencia a las aguas residuales es el virus de la hepatitis A; aunque la transmisión de virus resulte más dificultosa por medio del agua, es común que la hepatitis A se encuentre en aguas residuales (por medio de heces humanas). La hepatitis A afecta al hígado, y causa dolor en el estómago, náuseas, ictericia, falta de apetito y diarrea.

Dentro del agua residual también se pueden encontrar otros virus como el *Enterovirus*, *Adenovirus*, *Parvovirus* y el *Rotavirus*. Estos virus pueden causar enfermedades como la gastroenteritis, anomalías cardíacas, meningitis, enfermedades respiratorias y hepatitis como se mencionó con anterioridad.

La Tabla 36 muestra las enfermedades que comúnmente son causadas por el contacto con aguas residuales. Se recomienda que al presentarse cualquiera de estos síntomas después de haber trabajado directamente con aguas servidas se lleve a la persona con un médico para que reciba el tratamiento necesario.

**Tabla 36: Enfermedades más comunes causadas por aguas residuales.**

<b>Enfermedad</b>	<b>Microorganismo</b>	<b>Síntomas</b>
Fiebre tifoidea	<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre, dolor de cabeza, molestia general, pérdida del apetito, tos seca. Los latidos del corazón se hacen lentos, aumento del bazo. Algunas personas desarrollan manchas rosadas en el tronco del cuerpo.
Disentería bacilar	<i>Shigella</i>	Diarrea, cólicos.
Cólera	<i>Vibrio cholerae</i> Produce toxinas	Diarrea, deshidratación, shock y hasta la muerte.
Disentería amebiana	<i>Entamoeba histolytica</i>	Diarrea, dolor abdominal.
Hepatitis A	<i>Virus de la hepatitis A</i>	Nauseas, vómito, anorexia, fiebre, ictericia.
Giardiasis	<i>Giardia lamblia</i>	Diarrea, eructos, flatulencia (gases) y cólicos intestinales.
Criptosporidiosis	<i>Cryptosporidium</i>	Diarrea líquida, malestar estomacal o fiebre leve.

Para evitar el contacto con las aguas servidas, se recomienda utilizar la vestimenta y equipo apropiado que permitan minimizar la exposición o contacto directo con las mismas. En este caso,

es necesario utilizar ropa cómoda que permita tener buena movilidad, una bata de laboratorio de manga larga o un overol de algodón, zapatos cerrados con suela anti-deslizante (preferiblemente botas), casco, guantes, mascarilla y anteojos de protección. El objetivo principal de utilizar el vestuario y equipo de protección adecuado es evitar o minimizar el contacto directo que se pueda tener con las aguas residuales y los materiales que éstas incluyen para prevenir las enfermedades mencionadas anteriormente, aunque también se utiliza este equipo como protección contra riesgos de caídas y proyectiles.

b. **Riesgos mecánicos.** Estos pueden suceder a lo largo de cualquiera de las dos etapas: durante el llenado inicial del depósito y/o durante la operación del Biodigestor.

1) **Riesgos durante el vaciado y llenado inicial.** Inicialmente, al estar el depósito lleno de aguas residuales debido al primer intento de generación de biogás, debe de ser vaciado para poder llenarlo con material fresco para comenzar la producción. El vaciado estará a cargo de la compañía con el subcontrato, en este caso Hidro Fosas (al igual que la vuelta a llenar del depósito). En la etapa de vaciado del depósito, los riesgos son contaminación con las aguas residuales o abrasión por mal manejo de la manguera que utilizan para retirar el material. Al encontrarse vacío el depósito, se debe cambiar la válvula de salida por una de PVC, el riesgo en esta operación sería de abrasión por roscado y se puede evitar usando los guantes. Después se debe colocar el depósito en su posición final (sobre la mesa de madera) y los riesgos durante esta etapa son la contaminación con las aguas residuales; la vestimenta apropiada y la buena colocación de la mesa de madera son la manera en que se puede disminuir el riesgo de estos accidentes.

Los riesgos asociados con la actividad de carga y descarga del material al Biodigestor consisten básicamente en riesgos mecánicos, ya que la persona que realice el llenado se encuentra sobre una escalera. Se necesitan por lo menos tres personas para realizar esta tarea, una que se encargue de colocar la manguera dentro de la fosa séptica, otra que asista a la persona que se encuentra en la escalera para insertar la manguera en el depósito y que se quede sosteniendo la manguera; por último, la persona que se encuentra en la escalera que es la encargada de revisar el nivel indicado de llenado y asegurarse que la manguera no salga del depósito.

Hay varios riesgos asociados al manejo de la manguera, para la persona que se encuentra insertándola en la fosa séptica tiene que evitar acercarse demasiado al borde de la misma para

evitar caer dentro de ésta o golpearse con el borde en caso de resbalarse. Es por esto que para estos casos se deben de usar los zapatos adecuados y casco. Es importante utilizar también lentes de protección y mascarilla en caso de que la manguera se resbale o salpique materia al retirarla de la fosa, además de que la mascarilla ayuda a disminuir el mal olor que proviene de la fosa séptica. Para la persona que se encuentra ayudando a sostener la manguera el riesgo es que ésta se resbale y le caiga en una extremidad y lo lastime. Otro riesgo es ser salpicado por el material de la fosa séptica. De nuevo se puede observar la importancia del vestuario y equipo de protección adecuados.

El encargado de revisar el nivel de llenado del depósito también se encuentra expuesto a los riesgos mencionados anteriormente (ser golpeado por la manguera o salpicado por el material que se está transfiriendo al depósito), pero además se encuentra expuesto a un riesgo de caída ya que se encuentra sobre una escalera. Esto puede suceder si la escalera se encuentra mal colocada, si el terreno está resbaladizo o si la persona que se encuentra sobre ella hace un movimiento que resulte el desbalance de ésta. En caso de una caída, resulta importante el casco ya que protege la cabeza de un impacto directo con el suelo. La bata de manga larga, los guantes y las botas evitan abrasiones sobre las extremidades aunque si se pueden presentar abrasiones menores. Para evitar una caída de la escalera que resulte en quebraduras, torceduras u otros tipos de lesiones, es importante que la escalera se encuentre posicionada sobre una superficie firme y que esté bien anclada al piso; se recomienda utilizar una escalera de tijera para que sea más estable y se disminuya el riesgo de caídas.

Para evitar que la manguera se deslice y resulte hiriendo a los operarios se debe verificar que esté limpia antes de utilizarla (que no tenga material encima que facilite que se resbale) y una vez colocada en posición, asegurarla tanto al borde de la fosa séptica como al borde del depósito para evitar que se deslice y golpee a alguien o derrame material de la fosa séptica sobre alguien. Para asegurar la manguera los operarios deben prestar atención a la tarea que están realizando y tomar una posición segura que les permita supervisar los movimientos de la manguera.

En caso de que el material de la fosa séptica se derrame sobre una persona, ésta debe quitarse la ropa o equipo contaminado, lavarse el área contaminada con jabón antibacterial (o bañarse si es posible) y por último cambiarse y ponerse ropa limpia. La ropa contaminada debe de lavarse por aparte y dejarse remojando en cloro (si es blanca) o detergente (si es de colores) para tratar de remover las bacterias y parásitos y luego lavarla de manera normal.

2) **Riesgos durante la operación estándar.** Los riesgos más comunes durante la operación del Biodigestor son durante la toma de muestras, en donde se extrae una muestra del contenedor ya que al abrir la llave la persona puede contaminarse con las aguas residuales (sin importar si éstas salgan a poca o mucha presión, aunque resulta más peligroso si el contenido conlleva una presión alta).

Para este riesgo se vuelve a observar la importancia de utilizar el equipo de protección adecuado para no tener un contacto directo con los desechos. Otro riesgo presente es el de abrasión, ya que por ser un terreno a la intemperie y en tierra, la persona se puede tropezar y raspase. Se debe de mantener el área del Biodigestor lo más limpia y ordenada posible para evitar tropiezos y tener una buena visibilidad del equipo y su condición actual.

En la etapa de vaciado de los contenedores, también se encuentra el riesgo de contaminación por las aguas residuales y los residuos que se encuentren en ellos, así como el riesgo de abrasión por tropezarse con el equipo y raspase. Para evitar o disminuir este tipo de accidentes se debe de utilizar el equipo y vestuario adecuado cuando se esté operando el Biodigestor; de especial importancia resultan en esta fase los guantes, la mascarilla y los lentes de protección ya que cuando se depositen los residuos en el área de secado pueden darse salpicaduras además de fuertes olores.

c. **Riesgo de explosión.** El riesgo de explosión se da en la etapa de operación del Biodigestor, una vez que se está produciendo metano y biogás; la concentración del metano en el ambiente determina qué tan grande es el riesgo de explosión (a mayor concentración, mayor riesgo) y aunque en este caso se espera que sea baja, no se puede descartar el riesgo de explosión.

Este riesgo se daría en caso que exista una fuga de biogás y se tenga una fuente de fuego (como un cigarrillo, un fósforo o un encendedor) en las proximidades de la fuga de biogás. Es por esto que se prohíbe fumar o realizar actividades que involucren fuego (como una fogata) en un radio de 10 metros a la redonda del Biodigestor.

Las variables que se estarán controlando son la presión y temperatura ya que estas dos se encuentran relacionadas con el riesgo de explosión; por lo que se estarán tomando diariamente mediciones tanto de presión como de temperatura.

Es importante resaltar que gracias a que el Biodigestor se encuentra al aire libre, se disminuye significativamente el riesgo de intoxicación por fuga, ya que si estuviera dentro de un sitio

cerrado en caso de que hubiera una fuga, el gas quedaría encerrado y se iría acumulando y con el paso del tiempo podría llegar a niveles nocivos para los seres humanos.

**d. Riesgos eléctricos.** Los riesgos eléctricos asociados al Biodigestor vienen directamente de los sensores que se van a utilizar para medir presión y temperatura, ya que si se llega a dar un corto circuito puede causar una chispa que al combinarse con el biogás puede resultar en una explosión. Es por esto que los sensores deben estar aislados de manera apropiada, forrando los alambres expuestos con cinta de aislar, revisar que el enchufe al que se conecten esté en buenas condiciones y utilizar la vestimenta adecuada (guantes y botas con suela de caucho para no conducir la electricidad) para evitar accidentes.

La pantalla de los sensores irá en colocada en la mesa de madera sobre la que se encuentra el depósito, dentro de una caja de madera para protegerla del clima y de cualquier derrame o impacto directo; se debe proteger de la intemperie con el fin de que no se deteriore tan rápidamente y además se pueda disminuir la probabilidad de que ocurran accidentes eléctricos. También se utiliza una cerradura para evitar que cualquiera esté manipulando el lector de los sensores. Por otro lado, los cables pertenecientes a los sensores incluyen su propia protección, por lo que simplemente se debe de verificar el buen estado de estos y si se encuentran dañados, corregir el daño ya sea con una nueva funda o con cinta de aislar.

Otro riesgo eléctrico que se encuentra en el prototipo es la utilización de una fuente de poder para calentar las resistencias, ésta se encuentra conectada a una extensión que sale del Taller de Metal Mecánica y el riesgo se deriva tanto de ésta conexión como de la corriente que llega a las resistencias. Para evitar cualquier accidente, se debe de revisar el estado de la extensión y que la conexión esté en un lugar donde no le caiga agua; para evitar el riesgo que existe con las resistencias se colocó un plástico sobre la fibra de vidrio que cubre a las resistencias y no permitir que éstas se mojen o estén expuestas directamente a los rayos del sol.

**3. Señalización de los alrededores.** Como parte de la seguridad industrial el área del Biodigestor se encuentra señalizada con rótulos que indican que se está en un área que no es permitido fumar y que contiene gases que pueden causar una explosión por lo que se debe de tener precaución.

Resulta prioritario proteger el equipo para su correcto funcionamiento, prolongar su vida útil y evitar que las muestras se vean alteradas por factores exógenos, por lo que se recomienda instalar una malla perimetral. Ésta cumpliría con la función de evitar que personas ajenas al

megaproyecto tengan acceso al Biodigestor y no solamente se pongan en riesgo por no saber cómo manejarlo sino que de la misma manera pongan en riesgo los resultados del proyecto.

Además, se debe contar con un extintor en la cercanía de los alrededores del Biodigestor en caso de que comience un incendio cerca del sitio o en el mismo, en este caso se puede utilizar el del taller de Metal Mecánica; hay que tomar en cuenta que éste debe encontrarse de manera accesible para las personas (debe colocarse cerca del área y a una altura que resulte posible de alcanzarlo).

**4. Informe instructivo para enseñar buenas prácticas de un Biodigestor.** Para la correcta utilización del Biodigestor es importante tomar en cuenta las siguientes buenas prácticas:

- Utilizar la vestimenta apropiada siempre que se vaya a manipular el Biodigestor: Es importante que cualquier persona que vaya a operar el aparato tenga el vestuario necesario para evitar cualquier tipo de contaminación o enfermedad que sea derivada del contacto directo con aguas servidas. La función principal de tener un overol o bata de laboratorio y botas es proteger y minimizar la exposición de la piel a una fuente de bacterias y parásitos que puedan enfermar a las personas que tengan contacto con el material.
- Contar con los accesorios necesarios para reducir los riesgos de enfermedades: Se recomienda utilizar una mascarilla, lentes de protección, guantes y casco cuando se planea estar expuesto a las aguas de la fosa séptica o cuando se quiera manipular el Biodigestor ya que de esta manera se asegura que si hay algún tipo de contaminación directa con la materia, no sea sobre la piel, la boca o las vías respiratorias y se disminuyan significativamente las posibilidades de una enfermedad.
- Seguir las instrucciones de uso para el manejo correcto del Biodigestor: Al seguir el manual que indica la manera correcta para operar el Biodigestor, se asegura que éste se mantenga funcionando de la manera adecuada y sin que se vean alterados los resultados del proyecto en sí. Además al utilizarlo de la manera correcta se asegura no solamente que los resultados no sean influenciados por un mal manejo del equipo sino también que se maximice la vida útil del Biodigestor y se proteja la integridad de las personas que estén trabajando con él.

- Documentar los resultados y el estado del equipo: Cada vez que se utilice el Biodigestor es importante informar y reportar cualquier anomalía que se haya encontrado antes, durante y/o después de su funcionamiento; así como también se debe de reportar si se tuvo un funcionamiento normal y esperado del equipo. También se deben documentar los resultados obtenidos para la investigación y análisis posterior de los mismos. Para facilitar la toma de resultados y la estandarización de la misma, se deben utilizar los check lists proporcionados para tal fin.
- Liberación adecuada del metano generado: Ya que el metano que se genera en el proceso de biodigestión es un gas invernadero y una de las razones por las que se realizó el proyecto es utilizar fuentes alternas de energía, es de particular interés que el gas generado no se libere a la atmósfera para no continuar contaminando el medio ambiente. Es por esto que una vez se han tomado las mediciones de interés, resulta importante tener precaución en la liberación del metano producido del Biodigestor, éste debe de quemarse (utilizando un encendedor o fósforos) o utilizarse en una aplicación previamente seleccionada (hornilla, estufa, etc.).

## 5. Proceso a seguir para el manejo del Biodigestor

a. **Procedimiento estándar a seguir para la operación del Biodigestor.** El proceso de operación estándar del Biodigestor se puede dividir en tres etapas cuya sucesión es la siguiente: llenado inicial, operación y muestreo y vaciado de los contenedores. La etapa con la mayor duración es la segunda, ya que se estarán tomando muestras durante un mes y medio (desde el 21 de septiembre hasta el 26 de octubre). Se ha elaborado un proceso que indica las operaciones a realizarse de manera cronológica para que las personas que estén involucradas en la toma de muestras sean consistentes y la manera de obtener la medición no afecte los resultados finales de generación de biogás.

b. **Proceso de llenado inicial.** El primer proceso es el de llenado inicial, el que da apertura a todas las demás operaciones. Es necesario ya que con este se abastece el Depósito de aguas residuales y los otros tres contenedores posteriormente. El llenado inicial se puede dividir en dos etapas: la parte en la que se llena el depósito con las aguas residuales y la parte en la que

se llenan los tres contenedores que se encuentran bajo diferentes condiciones (control, temperatura constante y azúcar).

1) **Llenado de Depósito.** Número de personas necesarias para el proceso: 3 personas.

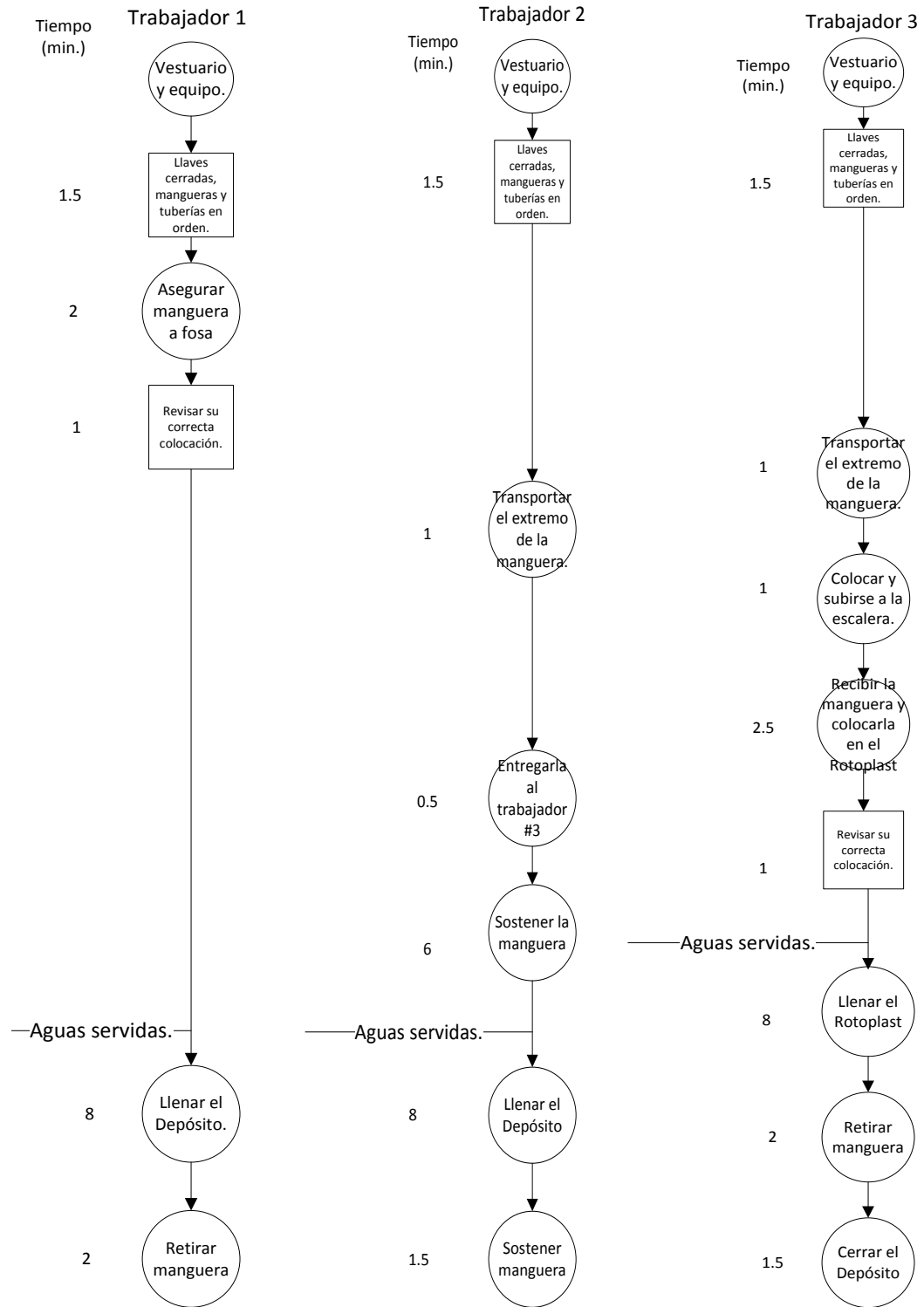
Inicialmente el depósito se encontraba lleno de aguas residuales que se utilizaron en pruebas anteriores, por lo que se debió de mezclar el material que ya tenía con el material fresco. Para realizar la operación se contó con tres personas, una encargada de colocar la manguera dentro de la fosa séptica, otra que asistía a la persona que se encuentra en la escalera para insertar la manguera en el Depósito y que sostiene la manguera y otra en la escalera que es la que revisa el nivel de llenado y se asegura que la manguera esté bien colocada.

A continuación se muestra el proceso de llenado inicial descrito anteriormente en un DOP dividido en tres, cada DOP le corresponde a un trabajador de la empresa que se encargó de la actividad y se encuentran lado a lado ya que las operaciones suceden de manera paralela.

**Tabla 37: Resumen proceso de llenado inicial**

Número de operaciones	Llenado de depósito	Llenado de los contenedores	Tiempo total por trabajador (en mins)
Trabajador 1	6	6	24.6
Trabajador 2	7	4	23.4
Trabajador 3	9	5	24.2

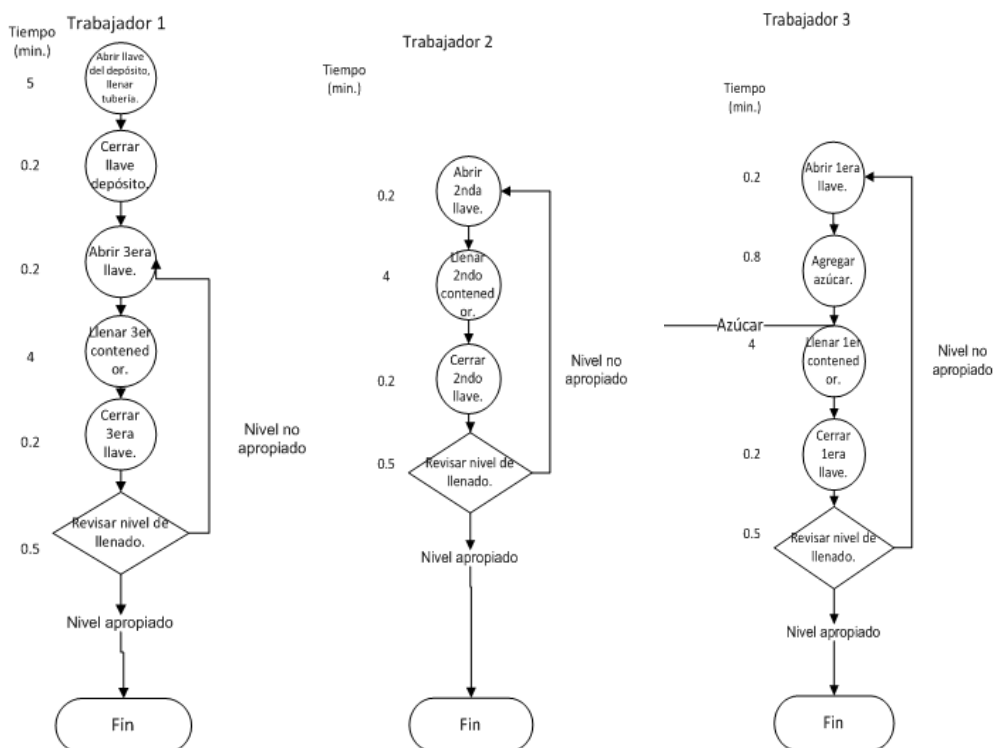
Ilustración 116: Llenado del depósito



1) **Llenado de los contenedores bajo diferentes condiciones.** Número de personas necesarias para el proceso: 3 personas.

Este proceso consta de, una vez que se tienen aguas servidas dentro del Depósito, transferir la materia a cada uno de los diferentes contenedores que se encuentran bajo condiciones distintas. Para lograrlo, solamente se tienen que abrir y cerrar llaves de paso para permitir o bloquear que las aguas residuales fluyan de un espacio a otro.

**Ilustración 117: Proceso de llenado de contenedores**



c. **Proceso de operación y muestreo.** Número de personas necesarias para el proceso: 2 personas.

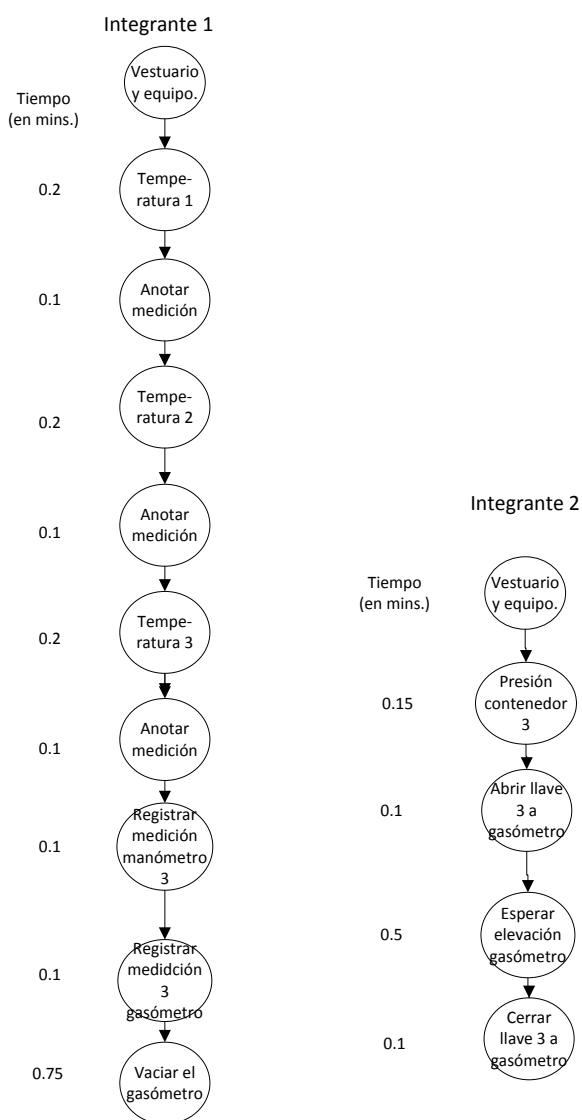
El segundo proceso es el de operación y muestreo y es el que tiene la duración más larga ya que durante este período se genera el biogás y se extraen las muestras del Biodigestor para obtener los resultados del proyecto. Se estarán controlando la presión, temperatura y DOB de las muestras correspondientes a cada contenedor. En esta etapa las personas encargadas de tomar mediciones y extraer muestras son los miembros del grupo, por lo que se les ha denominado como integrante 1 y 2.

Tabla 38: Resumen proceso de operación y muestreo.

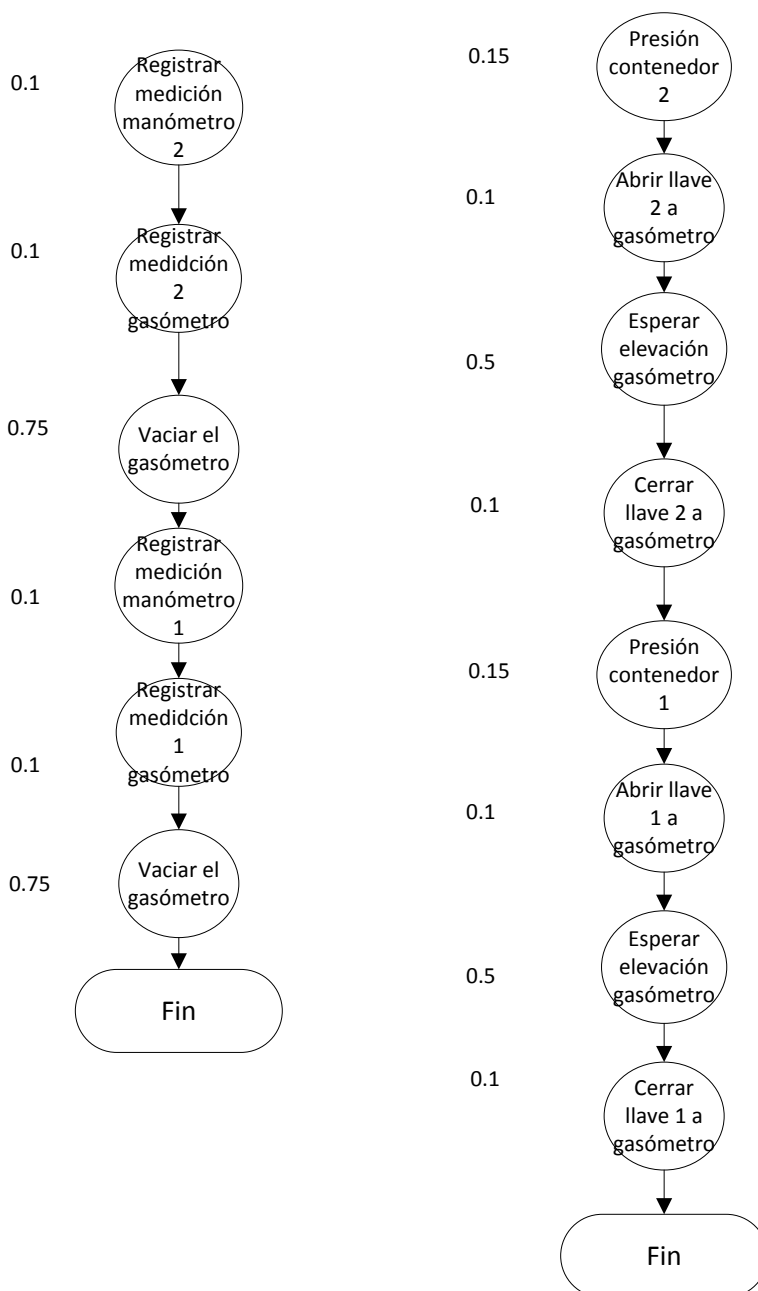
Número de operaciones	Operación y toma de muestras	Tiempo total por integrante (en mins)
Integrante 1	16	24.6
Integrante 2	13	23.4

A continuación se muestra el proceso de operación y muestreo descrito anteriormente en un DOP:

Ilustración 118: Operación y toma de muestras



Continuación Ilustración 118



**6. Vaciado de los contenedores.** Para el vaciado de los contenedores se tomaron en cuenta dos alternativas posibles: utilizar una plancha para depositar los desechos sobre ésta y dejarlos reposando bajo el sol hasta que se sequen, para que luego lo utilicen como compost; la segunda opción es contratar a una empresa para que se encarguen de retirar las aguas residuales de los contenedores y ellos dispongan de éstas.

Debido a la cercanía del proyecto con el Taller de Metal Mecánica utilizado por los estudiantes de la Universidad no resultó viable la opción de implementar la plancha de secado debido a los malos olores que despedirían las aguas residuales. Otro factor importante para desechar esta opción fue el espacio reducido en el que se encuentra localizado además de que por la ubicación del mismo no hay suficiente luz solar como para que la materia se seque.

Por las razones mencionadas con anterioridad, se eligió la contratación de una empresa para la remoción de los desechos de aguas residuales.

a. **Contratación de Hidro Fosas.** Número de personas necesarias para el proceso: 3 personas.

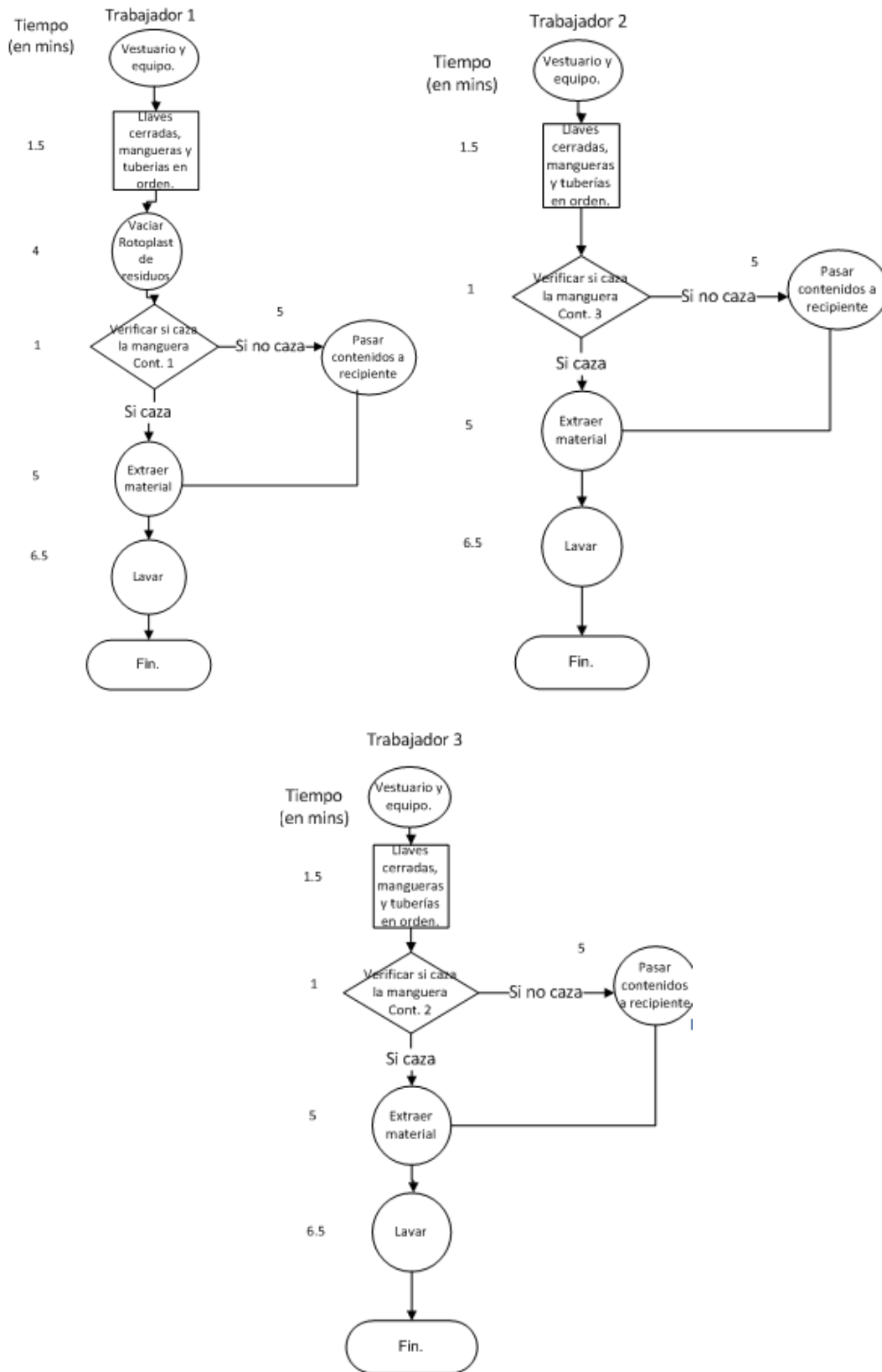
Una vez se ha concluido la etapa de recolección de muestras y se puede proceder a hacer el vaciado también se debe de tomar en cuenta esta alternativa ya que contratar a una empresa para que retire los desechos resulta ser una manera más eficiente de limpieza para el área en la que se trabajó y no se tiene el problema del mal olor prolongado. Ahora bien, la desventaja de esta alternativa la presentan los costos de contratación de la empresa que se encargará de la actividad y el tiempo necesario para conseguir el permiso y aprobación para realizar la operación.

**Tabla 39: Resumen proceso de vaciado**

<b>Número de operaciones</b>	<b>Vaciado de contenedores</b>	<b>Tiempo total por trabajador (en mins)</b>
Trabajador 1	6/7	18/23
Trabajador 2	5/6	14/19
Trabajador 3	5/6	14/19

A continuación se muestra el proceso de vaciado de los contenedores descrito anteriormente en un Diagrama de Operación del Proceso:

Ilustración 119: DOP proceso de vaciado de los contenedores



Como parte del proceso de operación se considera importante contar con un sistema de inventarios adecuado para el proyecto por lo que se eligió el Justo A Tiempo (JIT, por sus siglas en inglés), que es un método en el que reabastecimiento sucede justo en el punto en el que se queda sin inventario o aguas residuales en este caso.

Este sistema de control de inventarios se puede relacionar directamente con el abastecimiento del Biodigestor con la materia prima - el llenado del tanque Depósito con las aguas residuales - ya que éste se re-abastece únicamente cuando se vacían los tres contenedores y se va a comenzar a producir biogás por lo que se debe llenar de nuevo todo el prototipo con aguas negras.

Es necesario utilizar este sistema de inventario ya que si las aguas residuales se mantienen reposando dentro del Depósito, van perdiendo poco a poco su capacidad de generación de biogás puesto que continúan su proceso de degradación en lo que están almacenadas, por lo que resultaría ser un gran error utilizar aguas residuales que llevaran un período de tiempo en un contenedor del que no se extraerán muestras.

Es de extrema importancia la correcta elección del sistema de abastecimiento para el proyecto ya que si se mantuviera algún inventario de aguas residuales y luego éste se usará para obtener muestras y recolectar datos para su posterior análisis e inclusión dentro del estudio, se daría una variación y un error elevado porque las bacterias que producen el biogás ya habrían muerto por lo que no producirían gas, afectando los resultados y conclusiones finales.

Una ventaja de utilizar el sistema Justo a Tiempo es que los desperdicios producidos se reducen, puesto que el sistema se re-abastece únicamente con la cantidad necesaria y porque no hay materia de dónde seguir produciendo biogás. Con este tipo de inventario se pretende tener el inventario únicamente cuando el sistema está listo para producir.

**7. Guía para la correcta operación del Biodigestor.** El Biodigestor consta de distintas partes y piezas cuyo funcionamiento se debe conocer antes de operarlo, éstas son las siguientes:

- Depósito
- Contenedores bajo diferentes condiciones
- Gasómetro
- Sensor de temperatura
- Manómetros

- Llaves de bola (al final de los contenedores)
- Llaves de paso

a. **El depósito.** La función principal de éste se da en la etapa de llenado inicial, ya que en el depósito es donde se introducen las aguas residuales para su posterior reparto entre los tres contenedores, aunque también desempeña un papel importante en la toma de muestras y mediciones ya que en él se almacenan los excesos de material obtenidos durante la extracción de muestras: durante el proceso de obtención de muestras si se obtienen más aguas residuales de las deseadas, se como una medida para no contaminar al medio ambiente, se debe de almacenar esa materia en el depósito.

b. **Los contenedores.** El prototipo de Biodigestor cuenta con tres contenedores que se encuentran bajo distintas condiciones de producción: a temperatura constante (42° C aproximadamente), con azúcar como catalizador para el crecimiento de las bacterias que generan metano y por último el recipiente de control al que no se le ha modificado ninguna especificación. Se han modificado estas variables para determinar con cuál de las opciones presentadas se maximiza la generación de metano y, por ende, la de biogás. El contenedor que se encuentra a temperatura constante cuenta con una serie de resistencias forrándolo en su exterior, éstas se encuentran cubiertas con fibra de vidrio para mantener el calor y por encima se encuentra tapado con un plástico negro para evitar que la lluvia o sereno afecten ya sea a las resistencias o a la generación de biogás directamente.

Por su lado el segundo tonel, que contiene azúcar, se llenó de aguas residuales mezcladas con azúcar para observar si en efecto ésta promueve la generación de biogás. Tanto el contenedor que contiene las aguas servidas con azúcar como el de control no requieren de ningún tipo de cuidado adicional; sólo se debe monitorear su producción.

c. **Gasómetro.** El gasómetro construido está compuesto por una parte móvil y una estacionaria: una plancha de cemento y un contenedor lleno de agua, respectivamente. Se utiliza para medir la altura desplazada por la presión que se encuentra dentro de cada uno de los distintos recipientes y una vez tomada la altura, para liberar el biogás contenido dentro de los mismos.

d. **Sensor de temperatura.** Éste se encuentra situado en un lateral de la mesa que sostiene todos los contenedores, se encuentra apagado todo el día excepto cuando se realizan las mediciones (solamente se enciende para este propósito). El sensor es el encargado de reportar la

temperatura dentro de los tres recipientes, y se encuentra dentro de una caja de madera cerrada con llave para evitar que se arruine por estar expuesto a la intemperie o que cualquiera pueda manipularlo.

e. **Manómetro.** Se encuentra colocado un manómetro por contenedor, es decir, en total el prototipo cuenta con tres manómetros que indican la presión de cada recipiente respectivamente. Se encuentran conectados tanto al contenedor como al gasómetro por lo que para leer la presión únicamente se debe de leer la medición directamente en el aparato mientras que para liberar el biogás que contiene el recipiente y así poner el manómetro en 0 psi, se debe de abrir la llave conectada hacia el gasómetro y liberar el biogás.

f. **Llaves de bola.** Son las llaves que se encuentran al final de cada contenedor, las que permiten obtener muestras de la materia que se encuentra almacenada en cada recipiente. Éstas se utilizan durante todo el período de obtención de muestras y también en la etapa final (proceso de vaciado de los contenedores). Cuando se abren para la toma de muestras, se deben abrir de manera lenta y con cuidado para evitar que salgan más aguas residuales de la cuenta o que las mismas salgan disparadas.

g. **Llaves de paso.** Las llaves de paso se encuentran en cada una de las mangueras que conecta los tres recipientes del Biodigestor al gasómetro, adicionalmente también hay una en el gasómetro que es la que permite liberar el biogás almacenado.

En el caso de las llaves si el mango de la llave se encuentra perpendicular al flujo, la llave está cerrada. Por el contrario si la manecilla se encuentra paralela al flujo significa que está abierta.

**8. ¿Cómo realizar las mediciones?** Para operar el Biodigestor se debe contar con la vestimenta y accesorios adecuados, como los descritos en la sección de seguridad industrial para disminuir la probabilidad de accidentarse o enfermarse al estar trabajando con el Biodigestor. Una vez se cuenta con las condiciones adecuadas, se debe proceder a tomar las mediciones de temperatura y presión.

a. **Tomando la temperatura.** Para tomar la temperatura, dirigirse a la caseta que contiene la pantalla con el display de temperaturas. El lector se encontrará apagado, por lo que se debe encender apachando el switch de encendido que se encuentra en la base de la caseta. Se debe

esperar unos momentos para tomar el dato que muestre la pantalla ya que en lo que carga el sistema salen temperaturas que no son las reales entonces se debe tomar la medición cuando la temperatura mostrada sea la misma una y otra vez. La temperatura #1 es la del contenedor que tiene azúcar, la temperatura #2 es la del contenedor de control y la temperatura # 3 es la del contenedor que se encuentra calentado a temperatura constante. Cuando se han anotado las tres temperaturas, se debe de apagar el lector de temperaturas de nuevo.

b. **Midiendo la presión.** Para medir la presión se debe de hacer de manera individual para cada contenedor, no es relevante el orden en el que se realicen las mediciones. Se comienza por revisar que el gasómetro no esté atascado, y una vez se ha comprobado que se encuentra libre, se debe proceder a subir a la mesa sobre la que se encuentran los contenedores. Posicionarse enfrente del contenedor cuya presión se va a medir y observar el valor que indica el manómetro, anotarlo y luego de haber revisado que la llave del gasómetro esté cerrada (con la ayuda de otra persona) liberar el biogás contenido en el contenedor seleccionado y anotar la altura a la que llegó en el gasómetro. Anotar la altura en los check lists y una vez se haya cerrado la llave del contenedor, abrir la llave del gasómetro para liberar el gas y utilizarlo en la aplicación deseada o simplemente quemarlo para no contaminar al medio ambiente. Este mismo proceso se debe de repetir para cada uno de los contenedores.

c. **Muestras de agua.** El procedimiento para extraer las muestras de aguas residuales de los recipientes comienza con tener el material necesario para almacenar las muestras: es indispensable que cada vez que se vaya a realizar la toma de muestras se lleven botes para almacenar dichas muestras y una cubeta.

Una vez se tiene la vestimenta y accesorios adecuados, el bote para las muestras y la cubeta, se debe colocar la cubeta debajo del tubo PVC por el que saldrán las aguas residuales, abrir lentamente la llave de bola del primer contenedor al que se está extrayendo el contenido, no aplicar mucha fuerza o hacerlo muy rápido ya que las aguas residuales se encuentran bajo presión por lo que saldrán disparadas y se puede contaminar la persona que está realizando las mediciones. Cuando se observe que comienza a salir material, dejar que fluya por unos 5 segundos o hasta que se considere que se tiene la cantidad apropiada. Llenar el bote de muestra hasta la mitad y el sobrante que se encuentre en la cubeta (si existe el excedente), devolverlo al Depósito. Proceder a hacer lo mismo con los otros contenedores.

**9. Estándares de calidad.** Para asegurar la calidad del proceso, se deben de tomar las muestras siguiendo el proceso estandarizado que se describió con anterioridad (Ilustración #2: DOP proceso de operación y muestreo) para obtener resultados que tengan mayor confiabilidad y homogeneidad.

Se considera que las mediciones de temperatura y presión son un indicador de calidad ya que éstas reflejan la situación actual de las condiciones bajo las que está el proceso. Éstas afectan directamente la calidad puesto que el nivel de generación y calidad del biogás producido se ve influenciado por las variables de temperatura y presión, y esto se refleja en las muestras de aguas residuales extraídas de cada uno de los tres contenedores a través de la prueba de cromatografía líquida de alto desempeño (HPLC por sus siglas en inglés); por esta razón resulta importante realizar las mediciones de manera correcta.

Se diseñó un calendario para la toma de mediciones en el que se especifica qué días se deben de tomar muestras de presión y temperatura y los días que, además de las muestras anteriores, se deben de extraer adicionalmente aguas residuales; el procedimiento para toma de muestras se describe en el DOP de operación y muestras y, para una mayor comprensión, en el manual de operación del Biodigestor. El calendario abarca una parte del mes de Septiembre y todo el mes de Octubre, como se muestra a continuación:

**Ilustración 120: Calendario de mediciones septiembre 2011**

4	5 Labor Day	6	7	8	9	10
11 Patriot Day Grandparents Day	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21 Llenar Tanque. Todos 1 Todos 1 aprender a mue	22 Chapán	23 Autumnal Equinox Diego Diego 2 Mafer 2	24 Jose
25	26 Clara Clara 3 Mafer 1	27 Juanma	28 Mafer Mafer 4 Mafer 4 Mafer 2 Mafer 3	29 Rosh Hashana Diego	30 Chapán Chapan 5 Mafer 5	Clara

Ilustración 121: Calendario de mediciones octubre 2011

<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b> Yom Kippur
	Juanma	Diego	Mafer	Clara	Lopez	Chapán
	Juanma 6		Mafer 7		Lopez 8	
	Mafer 4		Mafer 7		Mafer 8	
			Mafer 6			
			Mafer 5			
<b>9</b>	<b>10</b> Columbus D	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
	Diego	Lopez	Mafer	Chapán	Clara	Juanma
	Diego 9		Mafer 10		Clara 11	
	Mafer 6		Mafer 10		Mafer 11	
			Mafer 9			
			Mafer 8			
<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>
	Chapán	Clara	Mafer	López	Juanma	Diego
	Chapán 12		Mafer 13		Juanma 14	
	Mafer 9		Mafer 13		Mafer 14	
			Mafer 12			
			Mafer 11			
<b>23</b>	<b>24</b> United Natio	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>
			Mafer 14			

La nomenclatura por colores es la siguiente:


- Celeste: Realizar prueba de temperatura, volumen (medir la altura del gasómetro) y presión.
- Amarillo: Extracción de muestra de aguas residuales.
- Anaranjado y verde: Pruebas iniciales y finales de  $DBO_5$ .

Como se puede observar en el calendario, las mediciones de presión y temperatura (además de la de altura de desplazamiento del gasómetro) se toman todos los días de lunes a sábado y se extraen aguas residuales todos los lunes, miércoles y viernes. Para contribuir con la estandarización del proceso y la calidad, se implementó la utilización de formatos en los que se revisa el estado del Biodigestor, los pasos (a grandes rasgos) de las operaciones, se anotan los resultados para la toma de mediciones, se encuentran enumerados los contenedores y las variables que se deben monitorear así como un encabezado que permite indicar quién está tomando las muestras y a qué horas se realizó la medición. También cuenta con un espacio para indicar observaciones acerca del estado del Biodigestor o de las condiciones bajo las que se realizó la medición. A continuación se muestran los formatos que se usan a lo largo del proceso.

- Formato de llenado inicial

Se utilizó este formato para corroborar que se implementaran las medidas de seguridad industrial requeridas y para buscar apegarse al proceso descrito en la estandarización, persiguiendo la homogenización de las operaciones.


**Tabla 40: Formato para el llenado inicial del depósito y los contenedores**

<b>Bio-Solutions</b> Checklist llenado inicial 	
Nombre:	
Fecha:	Hora:
Verificar el vestuario y accesorios necesarios.	
Bata de laboratorio de manga larga.	
Zapatos cerrados	
Casco	
Mascarilla	
Guantes	
Vaciado inicial de depósito	
Revisar el estado y limpieza del equipo: manguera, escalera y uniones.	
Revisar el estado del depósito.	
Verificar que la manguera esté bien ensamblada.	
Asegurarse que el depósito se encuentre vacío.	
Verificar que el PVC esté bien ensamblado.	
Comprobar que el depósito se encuentre bien colocado sobre la mesa.	
Verificar que la manguera esté bien asegurada.	
Verificar ensamblado correcto de todos los contenedores.	
Comprobar que las llaves de paso se encuentren cerradas.	
Asegurarse que el depósito se llene al nivel deseado.	
Revisar el llenado de los contenedores al nivel adecuado.	
Observaciones:	

- Formato de operación normal

Con este listado se pretende hacer una revisión del estado actual del Biodigestor cuando está operando, con el fin de detectar algún problema o desperfecto y poder evitar accidentes o el deterioro del equipo así como también homogeneizar el proceso de toma de datos.


**Tabla 41: Formato para verificar la operación normal**

<b>Bio-Solutions</b> Checklist operación normal 	
Nombre:	
Fecha:	Hora:
Verificar el vestuario y accesorios necesarios.	
Bata de laboratorio de manga larga.	
Zapatos cerrados	
Casco	
Mascarilla	
Guantes	
Revisar el estado del Depósito.	
Revisar el estado de los contenedores.	
Revisar el estado del gasómetro.	
Tomar mediciones de presión, temperatura y pH.	
Verificar que todas las llaves estén cerradas apropiadamente.	
Verificar que el equipo quede en orden.	
Observaciones:	

- Formato de toma de mediciones

Este formato se utiliza para la toma regular de mediciones con el objetivo de llevar un mejor control de las mismas, también sirve como recordatorio de la equipación necesaria para trabajar con el Biodigestor y ayuda a estandarizar la toma de datos.

Tabla 42: Formato para la toma de mediciones

<p style="text-align: center;"><b>Bio-Solutions</b> Mediciones <i>Bio-Solutions</i> </p>				
Nombre:				
Fecha:			Hora:	
Verificar el vestuario y accesorios necesarios.				
Bata de laboratorio de manga larga.				
Zapatos cerrados				
Casco				
Mascarilla				
Guantes				
Toma de muestras.				
	Temperatura (°C)	Presión (psi)	Altura (cm)	
Contenedor 1 (azúcar)				
Contenedor 2 (control)				
Contenedor 3 (temperatura)				
Observaciones:				

Los formatos no cuentan con una casilla para el DOB ya que éste se obtiene por medio de pruebas en el laboratorio, no se puede realizar la medición en campo. El objetivo de sacar muestras de las aguas negras es realizarle la prueba de DOB 5 a la materia bajo las distintas condiciones para poder determinar el potencial de generación a través de la cantidad de material orgánico disponible en las mismas; a mayor DOB, mayor generación de biogás.

La muestra extraída también se utiliza para poder realizar la cromatografía líquida de alto desempeño, que en este caso es la prueba que se realiza para conocer la calidad del biogás que está siendo producido.

La calidad del biogás fabricado básicamente depende del porcentaje de metano que contenga el gas, por lo que se necesita determinar la composición de éste. La cromatografía es una técnica que se puede utilizar para separar los gases contenidos dentro del biogás usando el punto de ebullición de cada gas; al quemar los gases, se van separando y es aquí donde se puede determinar el porcentaje que corresponde a cada gas.

Usualmente, el biogás contiene un 60% de metano por lo que ese será el valor de referencia para determinar la calidad del biogás generado. El grupo ha dispuesto que la calidad del biogás se clasificará de la siguiente manera:

**Tabla 43: Intervalos de calidad establecidos por el grupo**

Valor	Calidad
0% - 45%	Mala
46% - 59 %	Regular
60%	Estándar
61% - 75%	Buena
76% - 100%	Muy buena

a. **Instrumentos para establecer la calidad.** Se analizó el proceso de biodigestión del prototipo y se consideró pertinente la implementación de las siguientes técnicas de calidad:

1) **5 S's.** Este método de calidad es aplicable al prototipo de Biodigestor ya que al tener un área limpia y organizada de trabajo no solamente se contribuye a asegurar la seguridad industrial sino también a que la toma de mediciones resulte fácil y consuma un menor tiempo.

a) Clasificación. Los objetos se deben de clasificar en útiles e inútiles: los que serán útiles y los que no lo serán en el proceso, por lo que la basura y accesorios que no pertenezcan al prototipo se deben de remover del área de trabajo. En el caso del prototipo se pueden identificar como objetos inútiles la basura tirada en el lugar, las hojas secas y ramas que se encuentren entorpeciendo el paso.

b) Orden. En cuanto al orden necesario en el Biodigestor, se requieren pocas especificaciones ya que al estar ensamblado e instalado no hay partes sueltas que se deban de tener en un orden minucioso; es importante conocer la ubicación del extintor (este se encuentra

dentro del laboratorio de metal mecánica) y verificar que los alrededores no estén contaminados o que se esté utilizando el área para otros motivos no relacionados con el proyecto.

c) Limpieza. Lo más relevante es mantener el área despejada de basura y objetos innecesarios y monitorear que ésta permanezca libre de contaminación. En este caso en particular, las fuentes de contaminación son la basura que los pilotos o estudiantes dejan tirada en el lugar, las hojas y ramas de árboles que caen de manera natural y los desechos que se puedan derramar cuando se tomen muestras en el prototipo.

d) Estandarizar. Como parte de la implementación de seguridad industrial en el proyecto se señaló el área con rótulos que indican que no se debe fumar, se debe de tener precaución al estar en las cercanías y de no traspasar. Esta señalización también resulta útil para contribuir a la normalización de este método de calidad, ya que sin intrusos en el área es menos probable que haya contaminación (basura que dejen tirada los estudiantes o personal de los buses del Colegio Americano).

Para cumplir con la prevención de la aparición de desorden y suciedad, se deben de depositar los desechos en el basurero y recoger cualquier basura o rama que esté fuera de lugar.

e) Mantener. Con la finalidad de mantener el lugar libre de estorbos y de basura, se debe de estar revisando el estado de los alrededores constantemente y reforzarle a los integrantes del proyecto la importancia de contar con un lugar de trabajo ordenado y limpio para que todos se comprometan con ayudar a implementar el método constantemente para elevar la calidad del estudio.

2) **Kanban.** Las tarjetas Kanban se pueden utilizar como un método de calidad complementario para el sistema de inventarios elegido, el Justo a Tiempo, ya que su función principal es ser una orden de trabajo; esto es ya que indica el punto de re-orden, la cantidad necesaria, cuánto se va a producir (en este caso puede ser un estimado) y cómo se debe de transportar (si es necesario). El grupo que continúe con el proyecto utilizará las tarjetas Kanban colocadas sobre los contenedores como una guía para saber cuándo volver a llenarlos y con cuánto.

Implementar este sistema ayudará a mantener el orden y a llevar una mejor organización respecto al momento en el que se necesita realizar el llenado del Biodigestor de nuevo, ya que da

información de cuándo es necesario re-abastecerse y también ayuda al grupo a saber cómo manejar el material. Al implementar la tarjeta Kanban, se pretende controlar la producción ya que se sabe cada cuánto y cuánta cantidad se debe de ordenar y ayuda a mejorar los procesos puesto que únicamente se reabastece el prototipo cuando ya se han terminado las aguas negras para extraer muestras.

A continuación se muestran las tarjetas Kanban que se utilizarán para el Biodigestor:

**Tabla 44: Tarjeta Kanban para el contenedor depósito**

<b>Bio-Solutions</b> Tarjeta Kanban Contenedor Depósito	
Nombre	Contenedor Depósito
Número	0
Cantidad requerida de aguas servidas	1100 litros
Tipo de manejo de material requerido	No tener contacto directo, utilizar equipo de protección (bata, casco, guantes, mascarilla y lentes).
Dónde debe de ser almacenado al terminar el proceso	Todas las aguas residuales deben de descargarse hacia los respectivos contenedores.
Punto de reorden	30 días

**Tabla 45: Tarjeta Kanban para el contenedor 1**

<b>Bio-Solutions</b> Tarjeta Kanban Contenedor 1	
Nombre	Contenedor 1
Número	1
Cantidad requerida de aguas servidas	158 litros
Tipo de manejo de material requerido	No tener contacto directo, utilizar equipo de protección (bata, casco, guantes, mascarilla y lentes).
Dónde debe de ser almacenado al terminar el proceso	Los sedimentos excedentes deben descargarse hacia el camión de Hidro - Fosas.
Punto de re-orden	30 días

Tabla 46: Tarjeta Kanban para el contenedor 2

<b>Bio-Solutions</b> Tarjeta Kanban Contenedor 2	
Nombre	Contenedor 2
Número	2
Cantidad requerida de aguas servidas	158 litros
Tipo de manejo de material requerido	No tener contacto directo, utilizar equipo de protección (bata, casco, guantes, mascarilla y lentes).
Dónde debe de ser almacenado al terminar el proceso	Los sedimentos excedentes deben descargarse hacia el camión de Hidro Fosas.
Punto de reorden	30 días

Tabla 47: Tarjeta Kanban para el contenedor 3

<b>Bio-Solutions</b> Tarjeta Kanban Contenedor 3	
Nombre	Contenedor 3
Número	3
Cantidad requerida de aguas servidas	158 litros
Tipo de manejo de material requerido	No tener contacto directo, utilizar equipo de protección (bata, casco, guantes, mascarilla y lentes).
Dónde debe de ser almacenado al terminar el proceso	Los sedimentos excedentes deben descargarse hacia el camión de Hidro Fosas.
Punto de reorden	30 días

3) **Jidoka.** En este proyecto, se puede integrar el método Jidoka de calidad ya que con las muestras obtenidas de la producción de biogás se puede hacer una comparación entre los resultados obtenidos (los experimentales) con los estándares de producción de biogás. Éste se podría considerar como un sistema de inspección de calidad ya que básicamente consiste en comparar lo ideal o estándar para la producción vs. los resultados de producción real.

Con la implementación de este sistema se puede determinar si la producción cumple con los requisitos de calidad y tomar acciones correctivas si en caso no los cumple.

4) **Poka Yoke.** La aplicación de Poka Yoke en el Biodigestor resulta importante ya que contribuye a disminuir los riesgos de explosión de éste y a tener una operación y producción de biogás que permita aproximarse al nivel óptimo. Aunque nada está hecho 100% a prueba de

errores, los sistemas Poka Yoke ayudan a disminuir los accidentes que puedan suceder a lo largo del proceso de producción y en este caso en específico se pretende implementar con el fin de que no hayan variaciones extremas en los niveles de temperatura o presión que resulten afectando los resultados del proyecto o hasta en una explosión.

a) Métodos de advertencia. Como se mencionó anteriormente se podría utilizar como método de advertencia un sonido de alarma que alerte al guardia de turno cuando los niveles – ya sean de presión o temperatura – se encuentren fuera del límite permitido. Para evitar que las condiciones se alteren y afecten los resultados de la experimentación se activaría la alarma de sonido y el guardia de turno deberá llamar a la persona de contacto del grupo para que ésta tome las acciones pertinentes.

Este método de advertencia servirá como un sistema de calidad ya que permite controlar los intervalos de temperatura y presión para obtener resultados confiables y también para evitar accidentes mayores como podría suceder en el caso de una explosión o en caso de que una manguera o accesorio se pudiera zafar por la presión elevada y se vea afectada la producción de biogás.

b) Medidores utilizados en sistemas Poka Yoke. Existen una amplia variedad de medidores para sistemas de Poka Yoke, pero en este caso los que interesan son únicamente dos, esto ya que las variables de interés son la temperatura y la presión puesto que estas condiciones son las que regulan la generación de biogás.

- Manómetros:

Los manómetros son los encargados de desplegar los valores de presión para cada uno de los contenedores, el resultado se muestra en el manómetro conectado a cada contenedor y dependiendo si algún valor se encuentra fuera de lo que se considere adecuado para la generación de biogás, se puede liberar el biogás que se encuentra dentro del recipiente.

- Sensor de temperatura:

El sensor de temperatura muestra la temperatura a la que se encuentra cada uno de los contenedores en la pantalla que se

encuentra situada al lado izquierdo del prototipo y en caso se registre algún perjudicial para la generación de biogás (se debe prestar especial atención al contenedor de temperatura constante) se deben de tomar acciones correctivas.

b. **VARIABLES A MEDIR PARA DETERMINAR LA CALIDAD.** Para realizar las pruebas de calidad del biogás obtenido se deben monitorear las variables que afectan directamente a la producción del mismo:

- Temperatura
- Presión
- DOB5

Todas las condiciones a las que se encuentra sometida la muestra de aguas residuales, tales como la temperatura y la presión, son fundamentales para determinar el ritmo de producción y la calidad del biogás.

- La temperatura influye ya que si la materia se encuentra a un valor bastante alejado al ideal (ya sea por encima o debajo del valor óptimo), se disminuirá la producción debido a que las bacterias productoras de metano y demás gases no pueden vivir en estas condiciones. La temperatura ideal para la producción de biogás es de 30° C a 40°C, ya que es en este punto en el que se consigue la mayor generación de metano.
- La presión es un factor importante en el desarrollo de las bacterias generadoras de metano ya que, al igual que con la temperatura, éstas son sensibles a los cambios bruscos por lo que estar en cualquiera de los extremos del intervalo resulta perjudicial para la generación. La presión recomendada para optimizar la elaboración de metano es la ambiente, es decir, 1 atm.

En cuanto al pH de las aguas residuales éste también se puede tomar en cuenta en el desarrollo de las bacterias, aunque éste no se controló. Sin embargo, se sabe que un pH ácido mataría a las bacterias igual que uno básico. El pH que optimiza la generación del biogás es entre

7 y 8, resultando ligeramente alcalino y éste se establece de manera auto-regulada cuando el proceso funciona de manera correcta. (10)

**10. Divulgar y comunicar los resultados.** Una de las fases más importantes de un trabajo de investigación es dar a conocer los resultados obtenidos a lo largo del proyecto, ya que éstos ayudan a enriquecer a las personas y pueden traer beneficios o innovaciones para la comunidad. Debido a la importancia de esta actividad, se ha decidido dividirla en tres partes:

- Realizar una presentación pública para revelar los resultados obtenidos
- Crear una página de Facebook para informar
- Presentar los resultados a las autoridades de la Universidad

a. **Realizar una presentación pública de los resultados obtenidos.** Por otro lado, es una oportunidad para la generación de nuevas empresas o negocios dedicados al tema del proyecto: por ejemplo, en cuanto a la generación de biogás para su uso industrial es un nicho poco explotado en Guatemala y resulta una interesante oportunidad de negocio ya que no solamente puede llegar a ser rentable desde el punto de vista económico sino también presenta ventajas para el medio ambiente, especialmente en esta época en la que se fomenta la conciencia ecológica y la responsabilidad social por parte de los individuos y las empresas.

Se pretende que junto con los asistentes a la charla, esta presentación se utilice para educar a mucho más personas acerca del tema aunque no hayan asistido. Una de las metas de que se hagan públicos los resultados es educar a la mayor cantidad de personas posibles acerca del tema y que, ya que los resultados fueron positivos, se considere esta como una manera válida para la generación de biogás (a nivel industrial como agrícola).

b. **Crear una página de Facebook para informar.** Actualmente, el Internet y las redes sociales han cobrado una gran relevancia en la sociedad ya que contribuyen a la globalización y a que millones de personas de alrededor del mundo compartan sin importar la distancia. Es por esto que se ha elegido una de las redes sociales más relevantes para comunicar los resultados y mantener a las personas al tanto de lo que sucede con el Proyecto: Facebook.

Facebook es una de las maneras más eficientes de llegar a un amplio número de personas y cuenta con la ventaja de ser prácticamente actualizada en tiempo real, además que se pueden utilizar varios recursos para que la información sea interactiva como fotos, videos, estados y publicaciones entre otros. Para poder seguir las noticias del Mega Proyecto de Generación de

Biogás se debe contar con un usuario registrado en Facebook. Si ya se cuenta con éste, simplemente se debe de introducir en la barra de búsqueda el nombre Bio-Solutions UVG y darle buscar. Aparecerán los resultados de la búsqueda y allí se debe hacer click en el nombre del proyecto para acceder a la página; una vez en el perfil, se debe dar “like” o “me gusta” a la página para empezar a recibir las actualizaciones del contacto. La página se va actualizando conforme se va cambiando de etapa (llenado inicial, operación y muestreo o vaciado de los contenedores) y cuando se obtengan resultados se publicarán en el perfil.

El perfil de Bio-Solutions UVG también tiene fotos que muestran las condiciones actuales del prototipo de Biodigestor y se va actualizando diariamente; a continuación se presenta la página de perfil de Bio-Solutions UVG:

**Ilustración 122: Página en Facebook del Mega Proyecto**

The image shows a screenshot of a Facebook profile for "Bio-Solutions UVG". The profile is categorized as "Energy/Utility". The main content area displays a post from October 22, 2011, stating "Bio-Solutions UVG added 10 new photos to the album 22 October 2011." The post includes several photos of red biogas digesters. The left sidebar shows navigation options like "Get started", "Wall", "Hidden posts", "Info", "Photos", and "About". The right sidebar contains "Admins (1)", "Notifications", "Promote with an advert", "View Insights", "Sponsored" ads, and "Call Center Agents".

Actualmente la página está administrada por un miembro del grupo y se pretende que vaya obteniendo más seguidores conforme se obtengan resultados ya que acaba de iniciar la divulgación de los mismos y se cuenta con aproximadamente diez seguidores. Se pretende que esta página continúe siendo implementada en la siguiente etapa del proyecto por el grupo encargado de éste para que el conocimiento acerca del tema continúe aumentando.

**11. Presentar los resultados a las autoridades de la Universidad.** Los resultados del Mega Proyecto se presentarán a las autoridades universitarias en la forma del trabajo escrito, tanto grupal como individual. También se presentarán durante el examen de graduación y en la presentación pública. Se espera que este trabajo de graduación sea de utilidad para comenzar a utilizar energías alternativas e implementar proyectos que tengan conciencia ambiental.

El trabajo escrito quedará a disposición tanto de alumnos como de autoridades ya que se manda una copia a Secretaría y otra en la Biblioteca para futuras referencias.

a. **Seguridad industrial.** Se determinaron los riesgos a los que se encuentra expuesta cualquier persona que se disponga a trabajar con el prototipo de Biodigestor fabricado y con la materia prima de éste: riesgos biológicos, mecánicos, eléctricos y de explosión; así como también se indica el vestuario y accesorios necesarios para interactuar con aguas residuales y con un Biodigestor, bata de manga larga, botas, casco, lentes de seguridad, mascarilla y guantes. En esta sección también se desarrolló un manual de buenas prácticas de manejo de un Biodigestor que se localiza en el desarrollo del proyecto.

b. **Estandarización del proceso.** Uno de los principales resultados se ve reflejado en la estandarización del proceso completo: desde el llenado del Biodigestor hasta el vaciado del mismo. Éste se explica en el desarrollo del trabajo y se representa de manera gráfica en los Diagramas de Proceso Operativo (DOP) que también se encuentran en el desarrollo del trabajo. Además, se realizó un manual que indica la forma correcta de operar el Biodigestor, siguiendo los procesos estandarizados que se diseñaron.

c. **Estándares de calidad del proceso.** Se identificaron las herramientas de calidad aplicables al prototipo de Biodigestor así como también se determinaron los rangos de calidad del biogás generados para determinar si la generación cumple con los estándares de calidad establecidos por el grupo. Se determinó que la variable para conocer la calidad del biogás es el porcentaje de metano contenido en el biogás.

d. **Divulgar y comunicar resultados.** Se elaboró una página en la red social Facebook con el fin de informar a las personas acerca del progreso y etapa actual del Biodigestor; en esta misma se informarán los resultados finales acerca de qué condición fue la que propició un mejor biogás. Esta página también se utiliza para mostrar fotos del prototipo y para comunicarse con las personas interesadas en el tema de Biodigestores.

Oficialmente los resultados se comunicarán a través de la presentación pública que se realiza en la Universidad del Valle de Guatemala y a través de este reporte escrito a las autoridades de la misma, esta información también queda disponible en la Biblioteca.

### E. Módulo de Química:

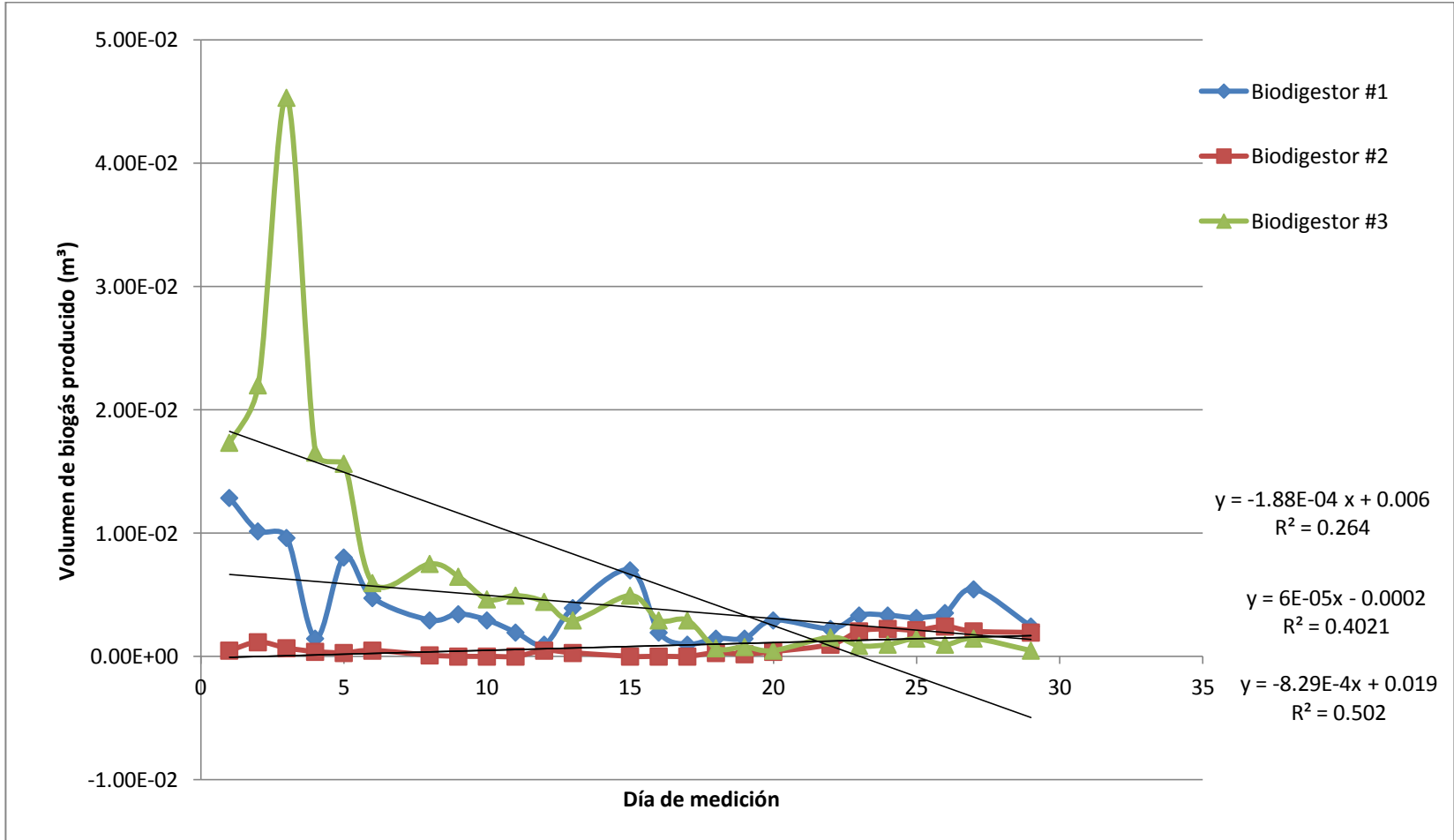
El sistema construido constó de tres Biodigestores, tal como se muestra en la Ilustración 127: Diagrama de bloques del proceso, conectados a un tanque principal. A los tres Biodigestores se les agregó el mismo sustrato, el que se homogenizó previamente en el tanque principal y que provino de la fosa séptica ubicada en el parqueo de buses del Colegio Americano de Guatemala.

Al primer Biodigestor, que durante el desarrollo del presente trabajo se denomina como Biodigestor #1, se le agregó azúcar en una proporción del 2% en masa. Esto para modificar la composición del sustrato. El segundo Biodigestor, denominado Biodigestor #2, sirvió de control, por lo que no se modificó ninguna variable, esto para poder asumir que cualquier variación de los resultados de los otros Biodigestores se debe a las variables que se controlaron. El tercer Biodigestor, llamado Biodigestor #3, tuvo un control de temperatura por medio de resistencias, lo que permitió mantener una temperatura interior más alta que la de los otros dos Biodigestores.

Entre el 26 de septiembre y el 24 de octubre de 2011, se realizó una digestión anaeróbica dentro de cada Biodigestor. El material de entrada de los tres Biodigestores fue el afluente constituido por las aguas residuales provenientes de la fosa séptica ubicada en el parqueo de buses del Colegio Americano de Guatemala, ésta contenía  $19.24 \pm 0.90$  g/L de sólidos totales (TS), en promedio.

Los compuestos a la salida del Biodigestor fueron biogás y el efluente. Ya que no se logró determinar la cantidad de  $CH_4$  del biogás de salida, se supuso, para la elaboración del reporte, que contenía un 60% de  $CH_4$  y que el resto era  $CO_2$ . En la siguiente tabla, se puede observar la producción de biogás de cada Biodigestor. Se puede observar que el Biodigestor #3 tuvo la mayor producción de biogás acumulada ( $174.235 \pm 0.258$  L) y promedio diaria ( $6.969 \pm 10.006$  L), seguido por el Biodigestor #1 con la producción acumulada de  $102.216 \pm 0.258$  L y un promedio diario de  $4.089 \pm 3.116$  L. Por último, se encontró el Biodigestor #2, que produjo  $19.033 \pm 0.258$  L y tuvo una producción diaria de  $0.761 \pm 0.847$  L.

Gráfica 10: Volumen de biogás producido diariamente



Como puede verse en la gráfica anterior, la producción de biogás del Biodigestor #3 fue mayor durante los primeros 12 días aproximadamente, y luego decayó hacia una producción muy parecida a la de los otros Biodigestores, esto puede deberse a que este Biodigestor estaba trabajando en condiciones termofílicas (en promedio), lo que, como indica la teoría tiene como resultado una producción abundante de biogás y un corto tiempo de retención. Esto explica la alta producción de biogás al inicio y el rápido descenso de la misma. El Biodigestor #1 tiene una producción de biogás menor, pero con una menor variación entre sus datos, es decir que tuvo una producción más constante y que después del día 12 se mantuvo más alta que la del Biodigestor #3. Esto indica que, si se desea un corto período de retención y alta producción se puede usar un Biodigestor con una temperatura controlada de aproximadamente 40°C, pero si se desea una producción constante por un período de tiempo más largo, se preferiría una modificación del sustrato. El Biodigestor #2 mostró la producción más baja, aunque, se puede observar que después del día 20, la producción empieza a aumentar, aunque poco, lo que podría indicar una activación tardía de la producción de biogás.

En la gráfica anterior se realizó una aproximación lineal, en la que se observa que el Biodigestor #1 presenta una pendiente negativa, lo que indica que su producción diaria va en disminución. La pendiente del Biodigestor #2, al contrario, es positiva, lo que podría corroborar la idea de que su tiempo de retención es mayor y tarda más en llegar a su máxima generación. Respecto a la tendencia del Biodigestor #3, se observa una pendiente negativa más pronunciada que la del Biodigestor #1, lo que indica que su descenso de producción es más grande y llegará a desactivarse, probablemente, más rápido.

A parte del biogás, a la salida de los Biodigestores se cuantificó la cantidad de sólidos totales (TS) y se determinó la disminución de los mismos. Como se observa en el siguiente tabla:

**Tabla 48: Remoción de sólidos totales**

	1	2	3
<b>TS inicial (g/L)</b>	19.24 ± 0.90	19.24 ± 0.90	19.24 ± 0.90
<b>TS promedio final (g/L)</b>	9.01 ± 0.81	14.92 ± 0.66	11.72 ± 0.83
<b>Remoción de TS (%)</b>	53 ± 0.64	22 ± 0.25	39 ± 0.48

El Biodigestor #1 fue el que mostró un mayor porcentaje de remoción de sólidos, seguido por el Biodigestor #3. Lo que indica, que si se deseara construir un Biodigestor para reducir la cantidad de sólidos totales en las aguas residuales, se recomendaría modificar el sustrato antes de aumentar la temperatura.

La alta producción de biogás y de remoción de sólidos totales del Biodigestor #1, sobre el #2 (control) puede deberse que al agregar azúcar (un disacárido) se tiene un sustrato fácilmente hidrolizable, por lo que la etapa 1 de la digestión anaerobia, que muchas veces es la etapa crítica, se reduce en tiempo. Esto puede permitir que se llegue más rápidamente a la etapa de metanogénesis.

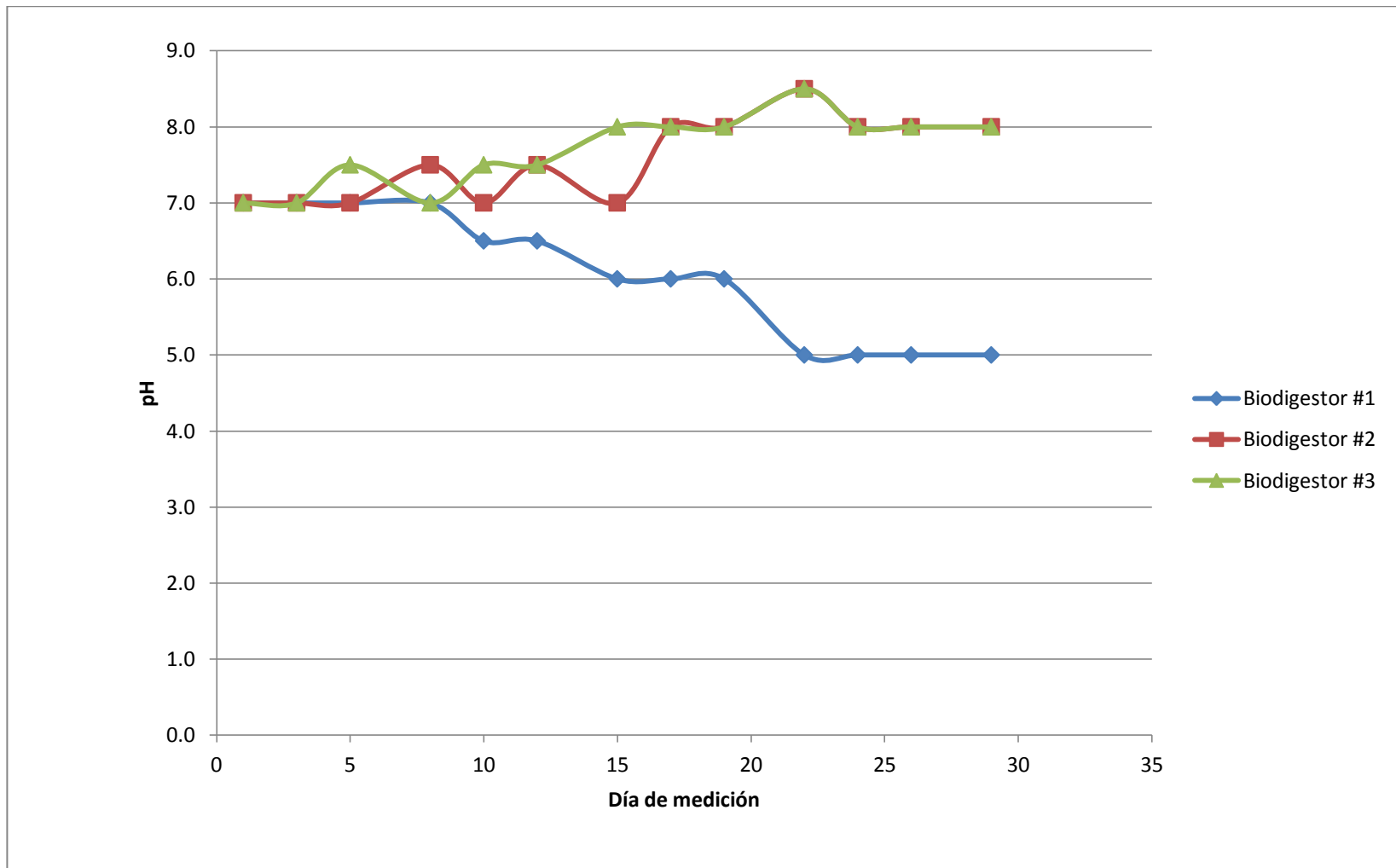
Comparando el Biodigestor #3 con el #2, se puede decir que su alta producción de biogás se debe a que la alta temperatura activa a las bacterias termofílicas, las que digieren la materia más rápidamente, lo que acelera la digestión anaerobia.

Otro de los parámetros controlados fue el pH de los Biodigestores. Como se observa en la Tabla 49: Promedio y desviación del pH cada tercer día, el pH del Biodigestor #2 y #3 tiene un promedio muy cercano a un pH neutro, mientras que el Biodigestor #1 tiene un pH promedio relativamente bajo. En la siguiente gráfica, se puede notar que luego del décimo día el pH del Biodigestor #1 empieza a disminuir. Esto puede deberse a que la alta concentración de azúcar (sacarosa), provoca una alta concentración de glucosa que se convierte fácilmente en ácido butírico y acético, entre otros. Si la siguiente etapa de la biodigestión, no ocurre a la misma velocidad que la formación de ácidos, el pH baja. Se puede esperar que el Biodigestor llegue a desactivarse en algunos días debido a la acidez del mismo.

**Tabla 49: Promedio y desviación del pH cada tercer día**

Biodigestor	1	2	3
<b>Promedio</b>	6.2	7.5	7.7
<b>Desviación Estándar</b>	0.8	0.5	0.5

Gráfica 11: pH cada tercer día



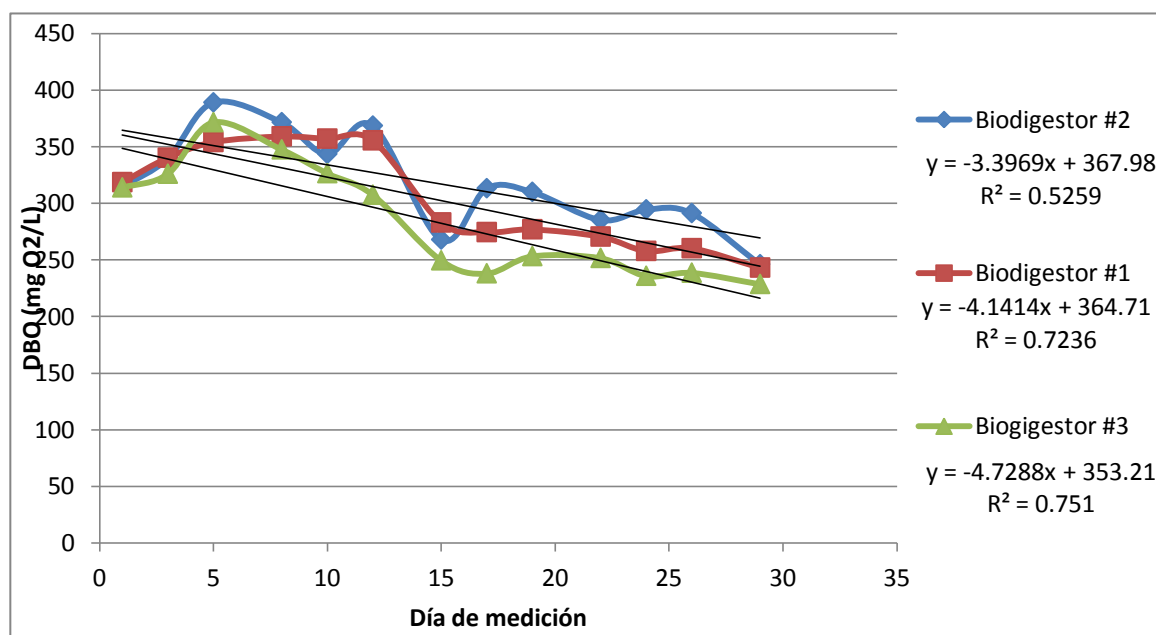
Respecto a la disminución del DBO, se puede observar en la tabla siguiente, que la mayor reducción del DBO se obtuvo con el Biodigestor #3, es decir, que una mayor temperatura permite obtener una mayor reducción del DBO. Le sigue el Biodigestor #1 y por último, el Biodigestor #2, esto puede deberse a la activación de la reacción por la modificación del sustrato, como se mencionó anteriormente.

Gráfica 12: Disminución de la demanda bioquímica de oxígeno en cada Biodigestor

Biodigestor	1		2		3	
<b>DBO inicial</b> (mg O <sub>2</sub> /L)	318	5	31	66.	313.	65.
	.56	6.48	4.63	29	94	85
<b>DBO final</b> (mg O <sub>2</sub> /L)	243	4	24	64.	228.	38.
	.13	7.91	6.06	26	63	01
<b>Reducción</b> (%)	24	4.	22	6%	27%	5%
	%	70%	%			

Al realizar una aproximación lineal de los resultados, como se observa en la, se observa que los tres Biodigestores muestran una tendencia hacia la disminución del DBO. El Biodigestor #3 tiene la mayor pendiente negativa, seguido por el Biodigestor #1 y por último el #2. En esta gráfica también se observa que aproximadamente, durante todos los días de muestreo el Biodigestor #2 mantuvo un mayor DBO que los demás Biodigestores y el #3 el menor.

Gráfica 13: DBO cada tercer día en cada Biodigestor



Otro de los parámetros que se midió regularmente, fue la presión generada dentro de cada Biodigestor. Los datos promedio se presentan en la Tabla 50: Presión promedio y desviación estándar en cada Biodigestor. La medición de este parámetro se realizó sólo como una medida de corroborar la medida del volumen de biogás producido. Se puede observar, que así como en la cantidad de biogás producido, el Biodigestor #3, tiene el valor mayor y el Biodigestor #2, el valor menor.

**Tabla 50: Presión promedio y desviación estándar en cada Biodigestor**

Biodigestor	1	2	3
<b>Promedio (KPa)</b>	0.4	0.1	0.4
<b>Desviación Estándar (KPa)</b>	0.2	0.1	0.5

Uno de los objetivos planteados al iniciar este trabajo de investigación fue el determinar el porcentaje de metano en el biogás. Esto se pretendió hacer por medio de un análisis de cromatografía de gases. Sin embargo, al intentar hacer las pruebas en los cromatógrafos existentes en el Laboratorio de Análisis Instrumental de la Universidad del Valle de Guatemala, se determinó que no era posible alcanzar dicho objetivo con los equipos disponibles. En el apartado 16. Cromatogramas de la sección de Anexos se pueden observar los cromatogramas obtenidos.

Las primeras pruebas se realizaron en un cromatógrafo de gases con un detector de espectro de masas. Debido al tipo de columna utilizada, no se logró separar cada componente y se obtuvo un solo pico. Sin embargo, observando el espectro de masas en diferentes puntos del pico obtenido y buscando los iones característicos del metano (12, 13, 14, 15, 16 y 17) del dióxido de carbono (12, 16, 22, 28, 44 y 45) se puede determinar que ambas especies se encuentran presentes en la muestra. Debido a la poca definición del pico no se pudo cuantificar la proporción de cada uno. Al buscar los iones característicos del sulfuro de hidrógeno, se observó que sólo el ion 32 se encontraba presente, por lo que se puede inferir que existe muy poco o nada de sulfuro de hidrógeno en la muestra.

A pesar de que no se logró realizar una comparación entre los porcentajes de cada componente en el biogás, sí se realizó una comparación entre el contenido de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> del biogás de cada Biodigestor. Al correr un estándar de CO<sub>2</sub>, se observó que su tiempo de retención es de 3.762 minutos (ver Ilustración 139: Pico observado por el análisis de estándar

de CO<sub>2</sub> con el detector TCD), al ser detectado por el TDC. Por lo que los picos obtenidos en dicho tiempo, para cada una de las muestras indican la presencia de dióxido de carbono. Se puede observar que el biogás del Biodigestor#1 contenía la mayor cantidad de dióxido de carbono y el Biodigestor #3, la menor. Para la determinación de metano, se utilizó un detector FID, ya que, como lo indica la teoría, éste es altamente sensible a hidrocarburos como el metano, pero no responde a la presencia de CO<sub>2</sub>, compuestos nitrogenados, ni sulfuro de hidrógeno. Se puede observar en el siguiente Tabla que el Biodigestor #1 también tuvo la mayor área del pico de metano, seguido por el #2 y por último el #3.

**Tabla 51: Área de cada pico en los cromatogramas de las muestras de biogás en cada Biodigestor**

Compuesto	1	2	3
<b>CO<sub>2</sub> (uV*s)</b>	1.978077E+03	1.768230E+03	1.688435E+03
<b>CH<sub>4</sub> (uV*s)</b>	1.308720E+05	1.168420E+05	1.114030E+05

Con base en estas pruebas, puede suponerse que la modificación del sustrato provee de un biogás más rico en metano, y por lo tanto, con mayor contenido energético. También se puede notar que llevar a cabo una digestión anaerobia termofílica provoca una disminución en la calidad del biogás.

## F. Módulo de factibilidad financiera:

### 1. Prototipo de Biodigestor:

a. **Descripción.** Se utilizó un Biodigestor tipo “Batch” para la implementación del prototipo, el cual consiste básicamente en una estructura metálica que contiene las aguas residuales que se le carguen, cuya estructura se encuentra herméticamente sellada.

El objetivo de este diseño consiste en permitir descomponer la materia orgánica que se encuentra en las aguas residuales, dando como resultado la producción de biogás, el cual es contenido en el área del Biodigestor para luego trasladarlo a un dispositivo de almacenamiento denominado gasómetro.

Los Biodigestores tipo “Batch” mantienen el material orgánico contenido por plazos de tiempo de aproximadamente 30 días, durante los cuales se descompone la carga de aguas

residuales que éstos contienen. Luego de finalizar el proceso, se libera el material digerido, y se ingresa una nueva carga de material.

b. **Ubicación.** El prototipo de Biodigestor se ubica actualmente en el parqueo de buses del Colegio Americano de Guatemala, justo al lado del Taller de Metal-Mecánica de la Universidad del Valle de Guatemala. El área que ocupa el Biodigestor, incluyendo el área de operación es de aproximadamente 9 metros cuadrados, la cual se encuentra delimitada, por una adecuada señalización en la que se restringe el paso.

c. **Características:**

1) **Generalidades.** El Biodigestor construido posee varias ventajas en cuanto al diseño y manejo, en vista que se estableció fijar los toneles de biodigestión de 263 litros con una inclinación de 45 grados y una terminación tipo embudo que permite y facilita el flujo de descarga en el momento en que se debe vaciar la carga que ya pasó por el proceso de descomposición dentro del Biodigestor.

Así mismo, la salida de las aguas residuales trabajadas se encuentra a cierta altura, de aproximadamente 40 centímetros que facilita la descarga en un contenedor de retención. En la siguiente imagen se puede observar la estructura del Biodigestor y el área que ocupa.

**Ilustración 123: Vista frontal del Biodigestor**



Adicionalmente, el Biodigestor cuenta con sistemas de medición de condiciones de presión y temperatura. La presión es medida, a través, de manómetros análogos; y la temperatura es medida, a través, de sensores electrónicos, que muestran de manera digital la temperatura interna de cada prototipo.

## **2) Variación entre los prototipos de Biodigestor:**

Para este estudio se decidió simular tres situaciones, por medio de tres prototipos de Biodigestor, con el fin de analizar el efecto que ocasionan ciertos factores, tales como una pequeña variación en temperatura y glucosa en la tasa de producción del biogás. Por esta razón se manejaron tres escenarios planteados por el área de ingeniería química del Megaproyecto:

- Biodigestor con adición de azúcar: A este Biodigestor se le agregó una proporción de azúcar a las aguas residuales, con el fin de proveer más alimento a las bacterias que descomponen la materia orgánica para determinar si logra mejorar el ritmo de generación. Este Biodigestor será referenciado como: Biodigestor 1.
- Biodigestor de control: Para este Biodigestor se decidió analizar los ritmos de generación de biogás en condiciones ambientales normales del entorno y únicamente con la carga orgánica que contienen las aguas residuales. Este Biodigestor será referenciado como: Biodigestor 2.
- Biodigestor con adición de calor y aislamiento del ambiente exterior: Para este Biodigestor se definió agregarle calor, a sabiendas que las bacterias que descomponen la materia orgánica se reproducen y trabajan mejor a temperaturas de 30-60°C. Este Biodigestor será referenciado como: Biodigestor 3.

## 2. Definición de costos de los Biodigestores:

a. **Inversión inicial.** Para la fabricación de los prototipos de Biodigestores, el equipo de ingeniería mecánica definió tanto el diseño, como los materiales a implementar. En la siguiente tabla se pueden observar los costos incurridos para la fabricación de los tres Biodigestores:

**Tabla 52: Costos de materia prima requerida para la elaboración de los prototipos de Biodigestor**

Item	Descripción abreviada	Proveedor	Monto
1	3 Biodigestores de 263L c/u	Maquinados Precisos	Q 7,123.80
2	Contenedor de llenado	Instalaciones Modernas	Q 762.00
3	Gasómetro	Novex, S.A.	Q 580.00
4	Aislante térmico	Praisa, S.A.	Q 120.00
5	Estructura de madera	Aserradero X	Q 1,908.00
6	Codos, tubería, válvulas, manómetros	Novex, S.A.	Q 742.00
7	Compra de material tubos, copas	Distribuidora la Ferre, S.A.	Q 1,747.00
8	Válvulas, tubería, llaves	Promerca	Q 2,098.00
9	Microcontroladores, sensores, batería	Jameco y Hobbyking	Q 1,442.06
<b>Total</b>			<b>Q 16,522.86</b>

De acuerdo a los registros se puede observar que el monto invertido para los tres Biodigestores alcanza la cifra total de Q.16,522.86. Sin embargo, se utilizó el mismo gasómetro, sistema de mediciones y un contenedor de llenado de mayor capacidad para los tres prototipos. A continuación se presentan los costos iniciales correspondientes a cada tipo de biodigestor, de acuerdo a los tres escenarios presentados, con sistemas de mediciones y contenedores de llenado independientes:

**Tabla 53: Costo inicial según prototipo**

Descripción		Prototipos de Biodigestores		
Ítem	Descripción abreviada	1	2	3
1	Biodigestor de 263L	Q 2,374.60	Q 2,374.60	Q 2,374.60
2	Contenedor de llenado	Q 200.00	Q 200.00	Q 200.00
3	Gasómetro	Q 580.00	Q 580.00	Q 580.00
4	Aislante térmico	Q -	Q -	Q 120.00
5	Estructura de madera	Q 636.00	Q 636.00	Q 636.00
6	Codos, tubería, válvulas, manómetros	Q 247.33	Q 247.33	Q 247.33
7	Compra de material tubos, copas	Q 582.33	Q 582.33	Q 582.33
8	Válvulas, tubería, llaves	Q 699.33	Q 699.33	Q 699.33
9	Microcontroladores, sensores, batería	Q 500.00	Q 500.00	Q 1,400.00
<b>Total</b>		<b>Q 5,819.60</b>	<b>Q 5,819.60</b>	<b>Q 6,839.60</b>

Los costos individuales descritos anteriormente son los que se definen como el costo de fabricar los tres tipos de Biodigestor (azúcar, control y calor) de 263 litros para que logren operar independientemente. Incluyen su propio gasómetro, sistema electrónico de mediciones y estructura de inclinación del Biodigestor. Estos costos iniciales son los que se utilizarán más adelante para proyectar el costo estimado de aplicar cualquiera de los módulos de biodigestión para el aprovechamiento de las aguas residuales de la Universidad del Valle de Guatemala.

b. **Costos de operación.** Los costos de operación varían de acuerdo al tipo de Biodigestor, debido a que en algunos casos se incurren en costos adicionales en su operación rutinaria.

Las variaciones que posee cada Biodigestor, de acuerdo a la finalidad del estudio, definirán una variación ventajosa de generación con respecto al Biodigestor de control, y se espera que los costos adicionales de operación que requiera, logren ser superados por el incremento en generación de biogás. Las variaciones representadas en costos son las siguientes:

▪ **Biodigestor 1 (azúcar):** Este Biodigestor requiere una adición de azúcar con un equivalente a un 2% de la masa de aguas residuales que contenga el Biodigestor. Para el prototipo de 197.25 litros se requieren aproximadamente 4 Kg de azúcar, y estando el azúcar a un precio de 7.7Quetzales/kg, representa un costo mensual de Q.30.80 adicionales.

▪ **Biodigestor 2 (control):** Este Biodigestor no posee costos adicionales de operación, debido a que no se le agregan factores extras al modelo. Únicamente se ingresa la carga de aguas residuales y luego se capta y utiliza el biogás que se genera.

▪ **Biodigestor 3 (Calor):** Este Biodigestor tiene la peculiaridad de tener una adición externa de calor, para lo cual se encuentra equipado con una resistencia equivalente a  $8.33\Omega$  que se alimenta de una fuente de poder de 26V, consumiendo 81.12W/hora, la cual se encuentra en funcionamiento las 24 horas del día, por lo que su consumo diario es de 1.94688kWh , y dado el costo promedio energético de la Universidad, que es 1.557169Q/kWh, y suponiendo todos los meses a 30 días, se define que el costo energético del Biodigestor es de Q.92.82 mensuales.

De acuerdo a la finalidad de los prototipos y tomando en cuenta que se tiene contemplado que se continúen haciendo estudios del manejo del Biodigestor durante los próximos dos años, no se tomará en cuenta el costo de mano de obra del personal que lo opera, pues éste será manejado con fines educativos por parte de un grupo de estudiantes que analizarán el aprovechamiento del biogás para un nuevo megaproyecto que se encuentra en su etapa de definición.

A continuación se muestra un resumen de los costos de operación mensuales que representa la operación de cada tipo de Biodigestor:

**Tabla 54: Costos de operación mensual por prototipo**

Detalle	1 (Azúcar)	2 (Control)	3 (Calor)
Insumos (guantes, mascarillas)	Q 30.10	Q 30.10	Q 30.10
llenado de Biodigestor	Q 900.00	Q 900.00	Q 900.00
Carga de azúcar	Q 30.80	Q -	Q -
Calentamiento de Biodigestor	Q -	Q -	Q 92.82
<b>Costos de operación mensual</b>	<b>Q 960.90</b>	<b>Q 930.10</b>	<b>Q 1,022.92</b>

Se puede notar que mensualmente se registran Q900.00 del costo para el llenado del Biodigestor, por extracción, el cual fue cotizado con la empresa Hidrofosas. Para este escenario se supone que cada Biodigestor opera individualmente, razón por la cual, deben absorber el costo completo.

### 3. Resultados de generación de biogás:

**a. Experimentales.** De acuerdo a los resultados obtenidos respecto a la generación de biogás de los prototipos, a lo largo de 30 días, se pudo observar una tasa de generación de biogás relativamente baja. En la siguiente tabla se puede observar la generación diaria de cada prototipo de Biodigestor:

**Tabla 55: Generación diaria de biogás en prototipos**

Prototipo	Generación (L gas/Biodigestor)	Equivalente (m <sup>3</sup> /Biodigestor)	Generalizado (m <sup>3</sup> gas/m <sup>3</sup> aguas R.)
Azúcar	8.036	<b>0.008036</b>	0.0407
Control	0.338	<b>0.000338</b>	0.00171
Calor	22.661	<b>0.022661</b>	0.1149

Se puede observar que la generación diaria de los prototipos es bastante baja, si se compara con la tasa de generación teórica que corresponde a 0.455m<sup>3</sup>gas/m<sup>3</sup>aguas residuales.

**b. Teóricos.** A cada prototipo de Biodigestor se le asignó un factor de generación, el cual llega a representar la ventaja en condiciones que trae consigo la mejora en el Biodigestor 1 y 3 (azúcar y calor) en relación a la producción de biogás. Este factor se definió intuitivamente basándose en la observación de los resultados, y se espera poder corregirlo en el momento en que se profundice más en el estudio de la generación de biogás.

En el momento de considerar la generación teórica de biogás de acuerdo a estudios anteriores de generación, se tiene que diariamente se producen 0.455m<sup>3</sup>gas/m<sup>3</sup>aguas residuales.

Por lo tanto, en el momento de asignarle la generación teórica que se debería tener en cada Biodigestor se multiplicó la generación básica por el factor de generación, los cuales se pueden observar en la Tabla 56.

**Tabla 56: Generación teórica de prototipos**

Prototipo	Factor de generación	Generación teórica (m <sup>3</sup> gas/m <sup>3</sup> aguas R.)	Generación aplicada (m <sup>3</sup> gas/m <sup>3</sup> aguas R.)	Generación por Biodigestor (m <sup>3</sup> )
1 (azúcar)	1.2	0.455	0.546	<b>0.1076985</b>
2 (control)	1	0.455	0.455	<b>0.08974875</b>
3 (calor)	1.5	0.455	0.6825	<b>0.134623125</b>

Se puede observar que con la cifra de generación teórica, aplicada a los Biodigestores, el ritmo de generación diaria es mayor y puede ser asignado a alguna aplicación para obtener provecho.

**4. Factibilidad del aprovechamiento de aguas residuales de la Universidad del Valle de Guatemala.** Hoy en día, existe una gran variedad de organizaciones dispuestas a financiar proyectos auto sostenibles en los que se aprovechen recursos naturales para la generación de energía. En este inciso, se busca definir el potencial energético de generación del aprovechamiento de las aguas residuales de la Universidad del Valle de Guatemala, con el fin de estimar un proyecto para generar energía eléctrica.

a. **Estimación de la generación de aguas residuales de la Universidad.** Actualmente la Universidad no cuenta con registros de la cantidad y volumen de las fosas sépticas que posee para la retención de los lodos que se encuentran en las aguas residuales. Se puede considerar que anteriormente no se le daba importancia a este dato, en vista que no se registra en los planos de la Universidad a los que se tuvo acceso.

Con base en lo anterior, se vio la necesidad de calcular un valor teórico de la generación de aguas residuales, lo cual permitirá obtener una estimación en cuanto al potencial energético que poseen.

De acuerdo a los antecedentes de la Universidad, en los que se define la cantidad de personas que asisten diariamente, incluyendo personal contratado, profesores y alumnos, se puede observar en la Tabla 57 la composición de dicho personal.

**Tabla 57: Estimado de personas que asisten a la Universidad diariamente**

Descripción	No. personas
Personal contratado por la Universidad	400
Estudiantes mañana (1/2 día aproximadamente)	800
Estudiantes tarde (1/2 día aproximadamente)	800
<b>Total</b>	<b>2,000</b>

De acuerdo a las especificaciones del fabricante de fosas sépticas denominado MAPRECO, se define que la fosa séptica debe contar con cierto volumen por persona que permanezca en jornada completa dentro de la Universidad. Para obtener el dato se hizo la suposición de que el personal contratado de la Universidad permanece en jornada completa, mientras que los estudiantes de la mañana como de la tarde permanecen, únicamente, media jornada. Por lo cual, se llegó a un equivalente de 1,200 personas que permanecen en jornada completa en la Universidad. De acuerdo a lo mencionado anteriormente, se puede presentar el valor teórico del volumen necesario de la fosa séptica que cubra los requerimientos de la Universidad:

**Tabla 58: Volumen teórico para la fosa séptica de la UVG**

Descripción	Capacidad
Personas diarias (8 horas de estadía)	1200
m <sup>3</sup> /persona requeridos en fosa	0.2
<b>Volumen teórico de fosa séptica (m<sup>3</sup>)</b>	<b>240</b>

Teóricamente, la Universidad cuenta con una capacidad de fosas sépticas de 240 metros cúbicos, la cual representa la totalidad de la fosa, sin embargo, se recomienda que ésta sea llenada únicamente hasta un 75%, lo que equivale a 180 metros cúbicos.

De acuerdo a las especificaciones del fabricante de fosas sépticas MAPRECO, las fosas sépticas alcanzan a llenar el 75% de su volumen total en 12 meses aproximadamente, por lo que con estos datos se puede definir el volumen aproximado de lodos generados mensualmente por todo el personal y alumnado de la Universidad. El resultado se muestra en la Tabla 59.

**Tabla 59: Volumen mensual de lodos generados**

Descripción	Datos
% de llenado total recomendado (por año)	75%
Volumen total de lodos acumulados (m <sup>3</sup> /año)	180
<b>Volumen disponible de lodos por mes (m<sup>3</sup>)</b>	<b>15</b>

Se establece que teóricamente la Universidad genera 15 metros cúbicos de lodos orgánicos por mes, los cuales poseen un gran potencial para la descomposición de sus componentes para la generación de biogás. Es importante tomar nota que de acuerdo a consultas realizadas al jefe de mantenimiento de la Universidad, se definió que no se utiliza únicamente una fosa, sino que el volumen estimado se encuentra disperso en varias fosas sépticas.

b. **Estimación de magnitud del Biodigestor y tasas de generación de biogás.** Para la proyección de la fabricación del Biodigestor requerido para aprovechar las aguas residuales de la Universidad, se supone que se aprovecha la totalidad de lodos generados mensualmente, los cuales son diluidos con el mismo fluido de aguas residuales para alimentar al Biodigestor planteado.

1) **Magnitud del Biodigestor proyectado para la Universidad.** De acuerdo a la estimación de lodos con los que se podrá disponer mensualmente en la Universidad, se definió que éstos corresponden a 15 metros cúbicos.

Posteriormente, de acuerdo a recomendaciones de dilución de lodos en aguas residuales para la operación de un prototipo de batch, se define el siguiente volumen total para el Biodigestor de la Universidad:

**Tabla 60: Volumen total y de llenado del Biodigestor**

Descripción	Datos
Sólidos en Biodigestor	30%
<b>Volumen de aguas residuales en el Biodigestor (m<sup>3</sup>/mes)</b>	<b>50</b>
% de llenado del Biodigestor con aguas residuales	75%
<b>Volumen total del Biodigestor (m<sup>3</sup>)</b>	<b>66.67</b>

En la Tabla 60 se puede observar que el Biodigestor proyectado puede contener 50 m<sup>3</sup> de aguas residuales cada mes, y su volumen total es de 66.67 m<sup>3</sup>, lo cual permite cierto espacio para el almacenamiento temporal del biogás generado.

Al analizar el volumen, se puede establecer que no se trata de una medida muy grande, pues el volumen puede ser almacenado de forma vertical para evitar el consumo de espacio.

Debido a las magnitudes del Biodigestor, se tiene contemplado que este modelo se ubique en el área del Taller de Metal/Mecánica de la Universidad del Valle de Guatemala, ya que es un área al aire libre, que posee mucho espacio aprovechable.

**2) Inversión inicial del Biodigestor.** Para definir el costo de la inversión inicial del Biodigestor se hará una proyección, basándose en el costo de los tres distintos prototipos que se implementaron en el área del Taller de Metal/Mecánica de la Universidad del Valle de Guatemala, de acuerdo a las dimensiones que se tienen proyectadas como teóricas para el nuevo Biodigestor.

Para definir la inversión inicial, se hará uso del método de Williams, el cual dados: costo 1, tamaño 1 y tamaño 2, mediante un factor genérico para todas las industrias permitirá dar un estimado del costo, considerando una similitud en el diseño y materiales. La fórmula para calcular el costo mediante el método de Williams es la siguiente:  $C2 = C1(T2/T1)^f$

Debido a que para la definición del C2 se pretende iniciar el análisis para enero de 2012, se supondrá que no hay variación en el tiempo de la inversión, pues es un dato estimado. Luego, las variables T1 y T2 corresponden al Tamaño en m<sup>3</sup> del volumen de aguas residuales que puede almacenar el prototipo de Biodigestor y el modelo proyectado para la Universidad. El factor f que se utilizará es un valor genérico que se aplica a cualquier industria con un valor de 0.67.

**Tabla 61: Inversión inicial del Biodigestor**

Dato	1 (Azúcar)	2 (Control)	3 (Calor)
C1	Q 5,819.60	Q 5,819.60	Q 6,839.60
T1 (m <sup>3</sup> )	0.19725	0.19725	0.19725
T2 (m <sup>3</sup> )	50	50	50
<b>C2</b>	<b>Q 237,433.31</b>	<b>Q 237,433.31</b>	<b>Q 279,048.19</b>

**3) Costos de operación proyectados.** Se debe considerar que para la operación de este modelo, se contratará a una persona encargada del servicio básico de la unidad y asistencia en el manejo y operación de la misma.

El perfil de la persona a contratar: Nivel técnico ya sea en mecánica o electrónica, con un salario estimado de Q.2,600.00 mensuales, que con las prestaciones de ley totaliza Q.3,692.00 mensuales. Se hace la estimación del costo de mantenimiento del Biodigestor de Q.200.00 mensuales. Adicionalmente, dentro de las variaciones en los costos mensuales de operación se pueden encontrar los siguientes:

a) Biodigestor 1 (azúcar):

Este Biodigestor requiere una adición de azúcar con un equivalente a un 2% de la masa de aguas residuales que contenga el Biodigestor. Para el Biodigestor de 50m<sup>3</sup> se requieren aproximadamente 1,020 Kg de azúcar, y estando el azúcar a un precio de 7.7Quetzales/kg, representa un costo mensual de Q.7,857.14 adicionales.

b) Biodigestor 2 (control):

Este Biodigestor no posee costos adicionales de operación, pues no se le agregan factores extras al modelo. Únicamente se ingresa la carga de aguas residuales y luego se le da provecho al biogás que se genere.

c) Biodigestor 3 (calor):

Este Biodigestor tiene la peculiaridad de tener una adición externa de calor. Para determinar el costo de operar este Biodigestor, se hará el cálculo mediante el método de Williams: siendo T1 0.19725m<sup>3</sup>, C1 Q92.82 y T2 50m<sup>3</sup>, el costo mensual de calentar el nuevo costo mensual de calentar el Biodigestor C2= Q.3,786.95. Éste será el costo energético para el Biodigestor de calor.

Los costos de operación de los distintos modelos de Biodigestor se presentan en la Tabla 62.

**Tabla 62: Costos de operación mensual del Biodigestor**

Detalle	1 (Azúcar)	2 (Control)	3 (Calor)
Insumos (guantes, mascarillas)	Q 30.10	Q 30.10	Q 30.10
llenado de Biodigestor	Q 900.00	Q 900.00	Q 900.00
Salario de operador	Q 3,692.00	Q 3,692.00	Q 3,692.00
Costos de mantenimiento	Q 200.00	Q 200.00	Q 200.00
Carga de azúcar	Q 7,857.14	Q -	Q -
Calentamiento de Biodigestor	Q -	Q -	Q 3,786.95
<b>Costos de operación mensual</b>	<b>Q 12,679.24</b>	<b>Q 4,822.10</b>	<b>Q 8,609.05</b>

Se puede observar que para los Biodigestores 1 y 3 (azúcar y calor), el costo que representa la adición de su valor agregado, representa un costo que duplica como mínimo la operación del Biodigestor de control.

**4) Generación teórica de biogás.** Considerando que se tiene un Biodigestor con 50 metros cúbicos de aguas residuales, y con el factor de generación de biogás por metro cúbico de aguas residuales obtenido en la Tabla 63 del inciso de generación teórica de los prototipos de Biodigestor, se pueden obtener las siguientes tasas de generación.

**Tabla 63: Generación diaria de biogás de acuerdo a su tipo**

Biodigestor	Generación estimada (m <sup>3</sup> gas/m <sup>3</sup> aguas R.)	Volumen aguas residuales (m <sup>3</sup> )	Generación diaria de biogás (m <sup>3</sup> )	Generación mensual de biogás (m <sup>3</sup> )
1 (Azúcar)	0.546	50	27.3	<b>819</b>
2 (Control)	0.455	50	22.75	<b>682.5</b>
3 (Calor)	0.6825	50	34.125	<b>1023.75</b>

Se puede observar que el ritmo de generación diaria, y por consiguiente, la generación mensual son relativamente elevadas, las cuales se espera que permitirán su aplicación en un generador eléctrico a base de biogás para reducir costos en el consumo de energía eléctrica.

c. **Generación de energía eléctrica a base de biogás.** La generación de energía eléctrica constituye la principal aplicación que se proyecta dar al biogás que se genere del aprovechamiento de las aguas residuales de la Universidad, y de esta manera obtener una reducción en los costos de consumo eléctrico de la Universidad.

Se pretende analizar la factibilidad de invertir en un generador eléctrico a base de biogás con una potencia de generación de 30kW, el consumo de biogás del generador es de 0.65 m<sup>3</sup>/kWh. El valor de inversión para la adquisición del generador es de aproximadamente Q. 21,492.36.

En la siguiente imagen se podrá observar el generador de 30kW.

**Ilustración 124: Generador de 30kW.**



Fuente: [http://www.alibaba.com/products/446527836/Biogas\\_Generator\\_Sets\\_30KW.html](http://www.alibaba.com/products/446527836/Biogas_Generator_Sets_30KW.html)

A continuación se presenta una Tabla de resumen de la generación de energía de acuerdo al volumen de biogás disponible mensualmente, y con el consumo de biogás del generador de 30kW de potencia, considerando el precio del kWh como: 1.557169Q/kWh.

**Tabla 64: Beneficio económico de operar el generador eléctrico**

Biodigestor	Generación mensual de biogás (m <sup>3</sup> )	Consumo en m <sup>3</sup> /h a una potencia de 30kW	Horas de uso mensual a 30kW	Equivalente monetario por mes
1 (Azúcar)	819	19.5	42	<b>Q 1,962.03</b>
2 (Control)	682.5	19.5	35	<b>Q 1,635.03</b>
3 (Calor)	1023.75	19.5	52.5	<b>Q 2,452.54</b>

A pesar de que los resultados muestran beneficios económicos en reducción de costos por el uso de biogás para la generación de corriente eléctrica, aún se debe completar el análisis de factibilidad financiera para establecer si el proyecto es rentable. Se debe tomar en cuenta que los costos mensuales de mantenimiento del generador son de aproximadamente Q200.00.

d. **Análisis de factibilidad financiera del proyecto.** Para el análisis de factibilidad financiera del Biodigestor, se considera un costo fijo para el mantenimiento del Biodigestor, al igual que una tasa fija para el mantenimiento del generador, que se pueden observar en la Tabla 65. Se espera que la inversión sea recuperada en un plazo de 20 años. La tasa de interés efectiva mensual correspondiente a la TMAR del proyecto es 0.643% mensual. Se trasladará el flujo de efectivo mensual a una sola anualidad para hacer el estudio en años, la tasa de interés TMAR anual es del 8%.

1) **Condiciones teóricas de generación.** Al analizar los ingresos obtenidos al utilizar el generador de 30kW basándonos en la generación teórica mensual, los costos e ingresos mensuales se muestran en la tabla a continuación:

**Tabla 65: Flujo de efectivo mensual del proyecto**

Detalle	1 (Azúcar)	2 (Control)	3 (Calor)
Costos de operación mensual Biodigestor	Q 12,679.24	Q 4,822.10	Q 8,609.05
Costo de mantenimiento generador	Q 200.00	Q 200.00	Q 200.00
Ingresos de generación teórica	Q 1,962.03	Q 1,635.03	Q 2,452.54
FE mensual	<b>Q (10,917.21)</b>	<b>Q (3,387.07)</b>	<b>Q(6,356.51)</b>

Con las condiciones teóricas de generación y los costos de operación tanto del Biodigestor como del generador, se puede observar que el flujo de efectivo para las tres alternativas es negativo, lo cual se mantendrá de esa manera en forma constante: los gastos de operar serán mayores que los ingresos, por lo que bajo las circunstancias analizadas el proyecto no es rentable.

Al observar la descomposición de los costos de operación, se puede observar que la operación mensual del Biodigestor es muy elevada, lo cual se atribuye principalmente al salario del técnico de mantenimiento y operación de la unidad.

**2) Condiciones teóricas de generación con reducción en costos de operación.** En este escenario se pretende obtener una estimación de los flujos de efectivo de operación mensuales de cada tipo de Biodigestor al eliminar el costo del salario del técnico que se había establecido inicialmente. Para poder eliminar esa plaza, se define que el proyecto es manejado de manera educativa por un grupo de alumnos voluntarios.

Esta reducción de costos genera un nuevo flujo de efectivo para cada tipo de Biodigestor, lo cual se puede observar en la siguiente tabla:

**Tabla 66: Flujo de efectivo mensual del proyecto con reducción de costos**

Detalle	1 (Azúcar)	2 (Control)	3 (Calor)
Costos de operación mensual Biodigestor	Q 8,987.24	Q 1,130.10	Q 4,917.05
Costo de mantenimiento generador	Q 200.00	Q 200.00	Q 200.00
Ingresos de generación teórica	Q 1,962.03	Q 1,635.03	Q 2,452.54
FE mensual	<b>Q (7,225.21)</b>	<b>Q 304.93</b>	<b>Q(2,664.51)</b>

Analizando los flujos de efectivo mensuales para el proyecto, se pueden excluir del análisis de factibilidad financiera los modelos de azúcar y calor, pues su flujo de efectivo mensual es negativo.

Luego se continúa analizando el Biodigestor 2 (control), el cual produce un ingreso mensual de Q.304.93. Como el análisis se hará por año, se debe calcular el valor futuro de las anualidades de ingreso para poder hacer un análisis posterior, el equivalente de ingresos por año, dada la tasa mensual de 0.643% es de Q.3,791.35. El resumen de los flujos de efectivo para los 20 años del proyecto se muestra en la Tabla 67.

**Tabla 67: Resumen de flujo de efectivo anual**

Datos	2 (Control)
Costo Biodigestor	Q 237,433.31
Costo generador 3kW	Q 21,492.36
Inversión inicial total	Q (258,925.67)
Ingresos anuales	Q 3,791.35
TMAR	8%
n (años)	20
<b>VP</b>	<b>Q (221,701.65)</b>

Se puede comprender que para un periodo de recuperación de 20 años, y dados los ingresos esperados del proyecto, no es económicamente factible, ya que el VP calculado con la TMAR en el período de tiempo del proyecto es menor a cero.

De acuerdo a los cálculos realizados se determinó que con los ingresos anuales que se tienen para este biodigestor, se puede comprender que a un plazo de 20 años no sería posible recuperar la inversión.

**3) Condiciones teóricas de generación duplicadas con reducción en costos de operación y reducción en 50% de inversión inicial.** Este escenario se formuló con la intención de definir si con cambios drásticos se puede volver rentable el proyecto de generación de energía.

Estas condiciones podrían ser alcanzadas en caso se lograra que el diseño del Biodigestor tenga una reducción en costos considerable al emplear materiales más económicos, un diseño más eficiente y que no se tuviera que contratar a ningún operador. Adicionalmente se consideró que la generación de biogás se duplicaba.

El flujo de efectivo mensual de la operación del Biodigestor, considerando las suposiciones mencionadas en el párrafo anterior se muestra en la Tabla 68.

**Tabla 68: Flujo de efectivo mensual con reducción en costos y generación duplicada**

Detalle	1 (Azúcar)	2 (Control)	3 (Calor)
Costos de operación mensual Biodigestor	Q 8,987.24	Q 1,130.10	Q 4,917.05
Costo de mantenimiento generador	Q 200.00	Q 200.00	Q 200.00
(Ingresos de generación teórica)*2	Q 3,924.07	Q 3,270.05	Q 4,905.08
<b>FE mensual</b>	<b>Q (5,263.17)</b>	<b>Q 1,939.95</b>	<b>Q (211.97)</b>

De igual manera, el resultado muestra que los Biodigestores 1 y 4 (azúcar y calor) no son económicamente viables bajo este escenario de generación duplicada de ingresos provenientes de la generación de energía.

El Biodigestor 2 (control) posee ingresos de Q.1,936.95 mensuales. Como el análisis se hará por año, se debe calcular el valor futuro de las anualidades de ingreso para poder hacer un análisis posterior, el equivalente de ingresos por año, dada la tasa mensual de 0.643% es de Q.24,120.64. Recuerde que para esta simulación, la inversión inicial fue reducida en un 50%, por lo que el resumen del flujo de efectivo para los 20 años del proyecto se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 69: Flujos y costos modificados anuales**

Dato	2 (Control)
Costo Biodigestor	Q 118,716.65
Costo generador 3kW	Q 10,746.18
Inversión inicial total	Q (129,462.83)
Ingresos anuales	Q 24,120.64
TMAR	8%
n (años)	20
<b>VP</b>	<b>Q 107,357.17</b>

Se puede observar que el VP de la operación del Biodigestor en las condiciones definidas, dada la TMAR de 8% anual es de valor positivo, por lo que se considera a este escenario como económicamente factible.

Ahora, con el período de duración del proyecto, se busca definir la tasa de retorno del escenario, para reconfirmar la factibilidad del mismo. Mediante la definición de la tasa utilizando la fórmula de TASA en Excel, se definió que la TIR= 18%, y dado que la TMAR=8%, se pasa la prueba de  $TIR \geq TMAR$ . El proyecto es económicamente factible.

Con el fin de establecer el período en años en que el proyecto logra cubrir sus costos, se presenta la siguiente tabla, la cual muestra el VP del proyecto dados los n períodos de funcionamiento:

**Tabla 70: VP del proyecto dados n años de funcionamiento**

n	VP
0	Q (129,462.83)
1	Q (107,128.91)
2	Q (86,449.35)
3	Q (67,301.60)
4	Q (49,572.21)
5	Q (33,156.11)
6	Q (17,956.02)
7	Q (3,881.86)
8	Q 9,149.78
9	Q 21,216.10
10	Q 32,388.62
11	Q 42,733.55
12	Q 52,312.19
13	Q 61,181.30
14	Q 69,393.44
15	Q 76,997.27
16	Q 84,037.86
17	Q 90,556.92
18	Q 96,593.08
19	Q 102,182.13
20	Q 107,357.17

De la tabla anterior se puede observar que a partir del año 8 se comienzan a generar utilidades para el proyecto, pues se logran cubrir y superar los costos de inversión. Es importante recordar que para este escenario, se tuvo que incurrir en una reducción en la inversión inicial de 50% y se redujeron significativamente los costos de operación. Los resultados obtenidos son bastante prometedores, por lo que se recomienda que se haga un análisis profundo en cuanto al diseño del Biodigestor, pues si se logra construir con materiales de menor costo, y se reducen los costos de operación al máximo posible podría ser un factor determinante para la viabilidad financiera del proyecto.

De los tres escenarios simulados para el Biodigestor para el aprovechamiento de las aguas residuales de la Universidad, únicamente este escenario es económicamente factible, y si se presentaran estas condiciones, el proyecto resultaría interesante para las organizaciones internacionales que promueven el desarrollo ambiental y podría generarse interés para su evaluación y asignación de financiamiento.

## VI. CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó la construcción de un prototipo funcional para la experimentación con biomasa y tres diferentes ambientes anaeróbicos.

La implementación de los prototipos “Batch” a pequeña escala proporcionaron los parámetros que sirven de base para establecer las dimensiones reales para la fabricación de Biodigestores de acuerdo a distintas capacidades requeridas.

El Biodigestor No. 3, al cual se le aumentó la temperatura, tuvo la mayor producción de biogás acumulada, seguido por el Biodigestor #1, al cual se le agregó azúcar como enriquecedor del sustrato.

Un Biodigestor con una temperatura mayor a los 40°C presentará una alta producción de biogás en un corto período de tiempo, mientras que un Biodigestor con un sustrato enriquecido mostrará una producción constante por un período más largo de tiempo.

Enriquecer el sustrato provee de un Biodigestor con mayor contenido de metano que aumentar la temperatura o no modificar ninguna variable, lo que indica un mayor poder calorífico del biogás.

Se logró estandarizar el proceso de operación del Biodigestor dividiéndolo en tres etapas: llenado inicial con tres personas y una duración de 25 minutos aproximadamente, operación y muestreo con dos personas y una duración de 24 minutos y el vaciado de los contenedores con tres personas y un tiempo máximo de 23 minutos.

Los sensores seleccionados para la medición de temperatura (PT100) y presión (SENSATA) en los prototipos de Biodigestores cumplen con los requerimientos necesarios para la aplicación.

Se diseñaron e implementaron los sistemas necesarios para las mediciones de temperatura, mediciones de presión, almacenamiento de mediciones en memoria SD y sistema de control para el aumento de la temperatura en el Biodigestor #3 por medio de resistencias eléctricas.

El microcontrolador seleccionados (PIC18F4620) cumple con los requerimientos necesarios para ser utilizado como controlador principal.

Bajo las condiciones iniciales sobre las cuales se basó el proyecto, para analizar el aprovechamiento de las aguas residuales de la Universidad para la generación de biogás por medio de un Biodigestor de acuerdo al volumen establecido, los resultados demostraron no ser viables financieramente.

El costo de las modificaciones a los Biodigestores 1 (al cual se le agregó azúcar) y 3 (aumento de temperatura), con relación al prototipo 2 (control), resultó ser mayor que el beneficio que representaban en el aumento de la generación de biogás, por lo que no resultaron económicamente factibles en ninguno de los escenarios en las dos aplicaciones estudiadas. Los mismos resultados fueron generados en el análisis del aprovechamiento de las aguas residuales de la Universidad.

La Universidad del Valle de Guatemala genera 15 m<sup>3</sup> de lodos residuales por mes, los cuales bajo las condiciones de los Biodigestores pueden producir respectivamente 682.5 m<sup>3</sup>, 819 m<sup>3</sup> y 1,023 m<sup>3</sup> de biogás mensuales.

El trabajo de Megaproyecto, además de permitirnos poner en práctica los conocimientos adquiridos en nuestra formación profesional, nos permitió interactuar y coordinar actividades con profesionales de las distintas ramas de ingeniería, reforzando y aplicando no sólo los conocimientos técnicos, sino también, los relacionados al proceso administrativo y de trabajo en equipo, canalizando los esfuerzos de todos hacia el logro de los objetivos mediante el mejor uso de los recursos disponibles.

## VII. RECOMENDACIONES

Diseñar un sistema de llenado que se conecte con la fosa de abastecimiento para evitar el problema logístico de la carga de aguas servidas.

Instalar una cerca perimetral para evitar que cualquier persona ajena al proyecto pueda manipular el Biodigestor, así como, para prevenir que el prototipo sufra impactos directos de objetos (buses, carros, pelotazos). Se recomienda un cerco perimetral de malla de acero, con una puerta con llave y sin techo ya que se necesita que los rayos del sol impacten directamente al Biodigestor para mantener la temperatura de generación en un rango aceptable.

Instalar sensores de temperatura y presión que no solamente reflejen la medición de las variables sino que también tengan una alarma que avise de manera auditiva cuando se registren niveles peligrosos dentro de los contenedores (temperaturas y presiones elevadas). Estos sensores con alarma ayudarán a prevenir que sucedan accidentes, ya que si se registra un nivel peligroso de una variable se puede corregir para evitar que haya una explosión o que se eche a perder un contenedor. La colocación de esta alarma ayudará a mejorar no solamente la seguridad industrial del Biodigestor sino también la calidad del biogás producido ya que al controlar las variaciones de presión y temperatura, se pueden mantener las condiciones más cerca de los valores ideales para la generación resultando en una optimización de la producción.

Construir o unir la escalera que se utiliza para subir a tomar las mediciones de presión, para disminuir el riesgo de una caída o de abrasión por en caso de caída, si no puede estar unida a la mesa, se recomienda que la escalera sea en forma de tijera para que la base ancha permita una mayor estabilidad cuando se esté subiendo a tomar los datos.

Reforzar la estructura que sostiene al Biodigestor, así como la mesa que sostiene al prototipo y al depósito para evitar que sufra deterioro por exposición a la intemperie.

Validar y mejorar el método de determinación de dióxido de carbono y metano en el biogás para futuras investigaciones. Podrían conseguirse estándares para cada compuesto o comprar otra

columna para el cromatógrafo de gases con detector de espectrometría de masas, que pueda separar dichos compuestos.

Variar la concentración de azúcar en el efluente, de manera que se encuentre la proporción de azúcar que provea la mayor cantidad de biogás y la mejor calidad, en forma óptima. Modificar la conexión de las RTD a una conexión de 3 hilos para evitar el error inducido por la longitud de los cables en las mediciones de temperatura.

Determinar si la generación de biogás en los prototipos es suficiente para realizar un sistema de calefacción que utilice el biogás producido como combustible en vez de energía eléctrica.

Utilizar un sistema CNC para elaborar placas de doble cara con el objetivo de reducir el espacio de los circuitos impresos (PCB) y el tamaño de la caja de control.

Reducir el tiempo necesario para aumentar la temperatura en el Biodigestor #3 utilizando resistencias eléctricas que disipen mayor potencia.

Medir la producción de biogás y degradación de materia orgánica en un Biodigestor con una modificación del sustrato y aumento de la temperatura, para lograr encontrar las condiciones de operación óptimas.

Se recomienda se evalúe el diseño y costos de fabricación del modelo proyectado para el aprovechamiento de las aguas residuales de la Universidad con el fin de ajustarlos para que el proyecto pueda ser económicamente factible.

Se debe tomar en cuenta que aunque los resultados de esta investigación no superaron la evaluación financiera bajo las condiciones iniciales, constituyen un punto de partida para nuevas investigaciones realizando las correcciones necesarias.

Es necesario realizar un análisis químico más preciso que defina la tasa exacta de generación de las aguas residuales utilizadas, con el fin de apegarse más a la realidad para contar con datos más precisos sobre el potencial energético de las mismas y evitar el uso de factores teóricos para el análisis financiero.

Es necesario continuar con los esfuerzos en la investigación a fin de que en un futuro cercano pueda aprovecharse el potencial energético de las aguas residuales de la Universidad que posteriormente pueda ser implementado por otras instituciones.

Se recomienda que se evalúe la posibilidad de utilizar paneles solares para alimentar la fuente de poder para el Biodigestor de calor y así eliminar el costo en el consumo eléctrico y de utilizar residuos frutales para el Biodigestor de azúcar con el fin de eliminar el costo del azúcar y definir si de esa manera resultan ser económicamente viables.

## VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. A., B., & S.K., P. L. Biogas Technology in the Third World: A Multidisciplinary Review. IDRC-103e. 132 pp.
2. Accord International, I. *Conexiones, Mangueras PVC. Catálogos de Productos Online*. . Catálogo de Productos Online.  
[http://www.accordintl.com/pagina\\_principal.html](http://www.accordintl.com/pagina_principal.html) .
3. *Aprovechamiento técnico del biogás: informe técnico*. (1988). Guatemala, Guatemala.: Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial. 48 pp.
4. Arian. Pt100, su operación, instalación y tablas. Colombia : 6 pp.
5. Arrecis Cabrera, H. H. (2007). *Válvulas PVC*. Guatemala: Tesis de la Universidad de San Carlos de Guatemala. 98 pp.
6. Asesorías, s. e. *Ventajas del PVC y CPVC*.  
[http://www.asumincol.net/productos\\_thermoplasticos\\_ventajas.htm](http://www.asumincol.net/productos_thermoplasticos_ventajas.htm).
7. *Asociación Española de Biogás*.  
[http://www.aebig.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=45&Itemid=2](http://www.aebig.org/index.php?option=com_content&view=article&id=45&Itemid=2).
8. Association, A. W. (2002). *PVC Pipe-Design and Installation*. Estados Unidos de América.: 2 ed. AWWA manual M23. 153 pp. .
9. Asper. *¿Qué es y Porqué PVC?* . <http://www.asperpro.com.ar/pvc.html>.
10. Barnett, A., & S.K., P. L. Biogas Technology in the Third World: A Multidisciplinary Review. IDRC-103e.
11. *Barnices de Exterior*. (2011). Grupo V33. <http://www.v33.es/productos-para-madera/barnices-de-exterior,316.html?>
12. Barrels, B. *Standards and Specifications*.  
[http://www.bucknerbarrel.com/pdfs/Standards\\_&%20\\_Specs.pdf](http://www.bucknerbarrel.com/pdfs/Standards_&%20_Specs.pdf).
13. Berkstresser, G. (1986). *Automation and robotics in the textile and apparel industries*. Estados Unidos de América: Noyes Publications. 328 pp.

14. Biodigestores. Bio-Nica, Portal sobre la Biodiversidad de Nicaragua. Muse Entomológico de De León. <http://www.bio-nica.info/biblioteca/Biodisgestores.pdf>.
15. Biodisol. <http://www.biodisol.com/que-es-el-biogas-digestion-anaerobia-caracteristicas-y-usos-del-biogas/digestion-anaerobia-proceso-de-produccion-de-biogas-biocombustibles-energias-renovables/>.
16. Blank, L. y. (2006). *Ingeniería económica*. India: 6 ed. McGraw-Hill. 815 pp.
17. Budynas, R., & Nisbett, K. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México: 8 ed. Editorial McGraw Hill. 1060 pp.
18. *Burkert Fluid Control Systems*. <http://www.burkert.es/ESN/336.html>.
19. *Caracterización de aguas residuales por DBO y DQO*. (2009). Chihuahua, México: Ingeniería de tratamiento de aguas. Universidad de Chihuahua.
20. Carrillo, L. (2004). *Energía de Biomasa*. San Salvador de Jujuy, Argentina: Leonor Carrillo.
21. Carrillo, L. (2003). *Microbiología agrícola*. Leonor Carrillo.
22. Castillo, S. L. (2008). *Robot explorador*. Guatemala.: Tesis de la Universidad del Valle de Guatemala. 96 pp.
23. Cengel, Y., & Boles, M. (2007). *Termodinámica*. México: 5 ed. Editorial McGraw Hill. 988 pp.
24. Close, E., David, J., & Juárez, J. (2007). *Biodigestores y Otras Soluciones Energéticas*. Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala. <http://Biodigestores.org/>.
25. Comisión Nacional del Agua de México, C. *Seguridad*. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Seguridad.pdf>.
26. Cordero, J. (2011). Estudio de factibilidad en el uso de Biodigestores para la producción de gas metano y reducción del consumo eléctrico en una finca dedicada a salinas y ganado. Guatemala: Tesis de la Universidad del Valle de Guatemala. 79 pp.
27. CPI, C. P. (2009). *La Guía Completa sobre Plomería*. Estados Unidos de América: Editorial Black & Decker. 331 pp. .
28. Crowe, C. T. (2007). *Mecánica de Fluidos*. México: 8 ed. Grupo Editorial Patria.
29. Dabkowski, B. (2008). *New Luminescent technology brings more accurate CBOD analysis*. Estados Unidos de América: Hach Company.
30. DeBona, J. (1999). *La gestión del Mantenimiento*. España. : Fundación CONFEMENTAL. 440 pp.

31. Deublein, D. y. (2008). *Biogas from Waste and Renewable Resources*. Alemania: Wiley-Vch.
32. Ebel, K. (1990). *Computer-Integrated Manufacturing: The social dimension*. Suiza: Oficina Internacional del Trabajo. 90 pp.
33. *El portal educativo del Estado Argentino*.  
<http://tq.educ.ar/tq02003/transformacion.htm#biogas>.
34. *Electronic Library of Construction Occupational Safety and Health (ELCOSH)*.  
<http://www.elcosh.org/es/document/303/d000283/peligros-biol%253Fos-en-plantas-de-tratamiento-de-aguas-negras-y-desechos.html>.
35. *Eroski Consumer, el diario del consumidor*.  
[http://www.consumer.es/web/es/medio\\_ambiente/energia\\_y\\_ciencia/2006/05/22/152178.php](http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2006/05/22/152178.php).
36. Gay, D. *Steel Drums To Steelpans*. University of the West Indies. Department of Civil Engineering. <http://www.eng.uwi.tt/depts/elec/staff/ssutherland/dgay%20-%20steeldrums-steelpansII.pdf>.
37. Gere, J. (2006). *Mecánica de Materiales*. México: 6 ed. Thomson Editores. 940 pp.
38. González, F. (2005). *Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado*. España: 2 ed. Fundación CONFEMETAL. 529 pp.
39. Guasumba, J. *Generación rápida de biogás, como alternativa energética promisorio*. Laboratorio de Energías Renovables, ESPE Centro de Investigaciones Energéticas, Tecnológicas y Ambientales.:  
<http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/123456789/1448/1/P70.pdf> .
40. Guevara Vera, A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de Biodigestores anaeróbicos rurales*. Lima: Organización Mundial de la Salud.
41. Hackett, W., & Robbis, G. (1989). *Manual Técnico de Seguridad*. México: Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A. 214 pp.
42. Hidalgo, J. (2010). *Aprovechamiento energético de biogás en El Salvador*. El Salvador: Tesis Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.
43. Hilbert, J. *Manual para la Producción de Biogás*. . Argentina: INTA Castelar.  
<http://www.inta.gov.ar/info/bioenergia/Manual%20para%20la%20producción%20de%20biogás%20del%20IIR.pdf>.
44. *Humedad en la Madera*. (2011). Revista Eroski Consumer de la Fundación Eroski.  
<http://www.consumer.es/web/es/bricolaje/carpinteria/2008/02/19/174697.php>.

45. ICAITI, I. C. (1988). Aprovechamiento energético de biogás, Informe Técnico final. Proyecto Leña y Fuentes Alternas de Energía. . Guatemala: 48 pp.
46. Industrial., I. C. (1998). *Aprovechamiento Energético de Biogás*. Proyecto de Leña y Fuentes Alternas de Energía. 48 pp.
47. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.  
[http://www.iica.int.ni/Estudios\\_PDF/Biodigestores.pdf](http://www.iica.int.ni/Estudios_PDF/Biodigestores.pdf).
48. Llanea, H., & al., e. (2010). Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás. España: PSE PROBIOGÁS.
49. López, F. (2007). *Elementos de Topografía y Construcción*. España: Universidad de Oviedo. 89 pp.
50. López, J. (1997). Manual de automatización por medio de controladores lógicos programables (PLC). Suiza: Oficina Internacional del Trabajo. 90 pp.
51. Mapreco, G. *Fosa Séptica*. [http://www.grupomapreco.com/fosas\\_septicas.html](http://www.grupomapreco.com/fosas_septicas.html).
52. Marsilli, A. (2005). *Tratamiento de Aguas Residuales*.  
<http://www.tierramor.org/Articulos/tratagua.htm>.
53. Martí Herrero, J. (2008). *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*. Bolivia: GTZ-Energía.  
[http://www.cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/89bib\\_arch.pdf](http://www.cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/89bib_arch.pdf).
54. Martí Ortega, N. (2002). *Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process*. Florida, Estados Unidos de América: Dissertation.
55. Maser, G. (2005). Recuperado el 13 de Julio de 2011, de [http://www.grupo-maser.com/PAG\\_Cursos/Auto/auto2/auto2/PAGINA%20PRINCIPAL/Automatizacion/Automatizacion.htm](http://www.grupo-maser.com/PAG_Cursos/Auto/auto2/auto2/PAGINA%20PRINCIPAL/Automatizacion/Automatizacion.htm)
56. Maser, G. (2005). *Automatización [En línea]*. [http://www.grupo-maser.com/PAG\\_Cursos/Auto/auto2/auto2/PAGINA%20PRINCIPAL/Automatizacion/Automatizacion.htm](http://www.grupo-maser.com/PAG_Cursos/Auto/auto2/auto2/PAGINA%20PRINCIPAL/Automatizacion/Automatizacion.htm).
57. *Methane generation from human, animal, and agricultural wastes*. (1977). Washington, D.C., Estados Unidos de América: National Academy of Sciences.
58. *Módulo 6: Desperdicios*. (1996). Japón: Directrices del IPCC para los inventarios de gases de efecto invernadero.
59. Niebel, B., & Freivalds, A. (2009). *Ingeniería Industrial: Métodos, estándares y diseño del trabajo*. México D.F. : 12 ed. Traductores: Carlos Roberto Cordero y Jesús Murrieta. McGraw-Hill. 586 pp.

60. Oak Ridge National Laboratory, (. *Carbon Steel Tight Head 55-Gallon Drum Specification*. <http://www.ornl.gov/sci/tpm/pdf/CSTHDrum/101-6350pscreen.pdf>.
61. P. e.  
<http://www.cosechaypostcosecha.org/data/articulos/biocombustibles/ProduccionBiogasGranjaMarujo.asp>.
62. Péreze, M. (2004). *Producción de energía Eléctrica a Partir de Biogás Procedente de Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos*. Guatemala: Tesis de la Universidad de San Carlos de Guatemala. 160 pp. .
63. Perry, R., & et.al. (1984). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. Estados Unidos: 6 ed. Mc.Graw-Hill.
64. *Pontificia Universidad Javeriana*.  
<http://www.javeriana.edu.co/Facultades/Ciencias/neurobioquimica/libros/celular/cromatografia.htm>.
65. Portal corporativo Servicio Evangélico para el Desarrollo (SEPADE).  
<http://www.sepade.cl/proyectos/biodigestor.php>.
66. Preston, T., & Botero, R. (1987). *Biodigestor de Bajo Costo para la Producción de Combustible y Fertilizante a Partir de Excretas*.  
<http://www.utafoundation.org/publications/botero&preston.pdf>.
67. QuimiNet. (2004). Recuperado el 17 de Agosto de 2011, de  
<http://www.quiminet.com/articulos/que-es-la-automatizacion-27058.htm>
68. Ramirez, L. (2005). *Recomendaciones para el uso de fosas sépticas prefabricadas y medición de su eficiencia*. Guatemala: Tesis Universidad del Valle de Guatemala.
69. *Reutilización de Agua Residual Regenerada*. <http://mie.esab.upc.es/arr/T9E.htm>.
70. Rocatek. (2006). Recuperado el 15 de Agosto de 2011, de  
[http://www.rocatek.com/forum\\_automatizacion\\_industrial.php](http://www.rocatek.com/forum_automatizacion_industrial.php)
71. Rodríguez, J. A. *Tratamiento anaerobio de aguas residuales*. Cali, Colombia: Universidad el Valle.
72. Sáenz Wirtz, O. (2007). *Evaluación de la eficiencia de dos digestores anaerobios existentes de dos granjas de crianza de cerdos*. Guatemala, Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala.
73. Skoog, D. (2008). *Principios de análisis instrumental*. Santa Fe, México: Cengage Learning.

74. Steel, E. N. *Estimated Mechanical Properties and Macihnability Ratings of Re-Sulfurized Carbon Steel Bars*.  
[http://www.eaglesteel.com/download/techdocs/Estimated\\_Mechanical\\_Properties.pdf](http://www.eaglesteel.com/download/techdocs/Estimated_Mechanical_Properties.pdf)
75. Tercero, C. (2003). Control de flujo y presión de líquidos y gases en una torre empacada con seguimiento de temperatura. Guatemala: Tesis de la Universidad del Valle de Guatemala. 79 pp.
76. Toolbox, T. E. *NPT pipe threads; Dimensions according to ASME/ANSI E B1.20.1*.  
[http://www.engineeringtoolbox.com/npt-national-pipe-taper-threads-d\\_750.html](http://www.engineeringtoolbox.com/npt-national-pipe-taper-threads-d_750.html).
77. UNAD, U. N.  
[http://www.unad.edu.co/fac\\_ingenieria/pages/Microbiologia\\_mutimedia/4\\_1calidad.htm](http://www.unad.edu.co/fac_ingenieria/pages/Microbiologia_mutimedia/4_1calidad.htm).
78. Vignote Peña, S. (2006). *Teconología de la Madera*. Madrid, España.: 3 ed. Ediciones Mundi Prensa. 678 pp. .
79. WordReference. (2010). Recuperado el 2 de Julio de 2011, de  
<http://www.wordreference.com/definicion/>

## IX. Anexos

### A. Situación actual del sector donde se instalaron los prototipos de Biodigestor

Actualmente, los conductores de buses, que utilizan el área de área del Taller de Metal/Mecánica de la Universidad del Valle de Guatemala, donde se montó el proyecto con los prototipos del Biodigestor, luego de realizar las actividades diarias de limpieza y mantenimiento de los vehículos, cuentan con un área de descanso en la que pueden refaccionar y almorzar, la cual está equipada con mesas, microondas, una estufa de gas y una eléctrica, las cuales son utilizados para la preparación de alimentos.

Se puede considerar que el personal que labora en el parqueo de buses tiene una necesidad energética para la preparación de sus alimentos, para lo cual utilizan una estufa eléctrica. En la Ilustración 5, se puede observar la hornilla eléctrica que utilizan y debajo de la misma, se observa la estufa a gas, que también, tienen disponible.

La utilización de esta estufa representa un costo en concepto de energía para el Colegio Americano, por lo que se analizará la factibilidad de utilizar el biogás obtenido del prototipo de Biodigestor para la operación de un quemador de gas que permita a los trabajadores preparar sus alimentos de forma rutinaria, reduciendo costos para el colegio.

**Ilustración 125: Estufa utilizada por el personal del área de parqueo de buses**



De acuerdo a las especificaciones de la estufa Rochedo, ésta consume 1,000Watts por hora y es utilizada aproximadamente 2 horas diarias en total, siendo utilizada por varios conductores. Considerando el costo promedio de la energía de la Universidad (1.557169Q/kWh), diariamente se tiene un costo de Q. 3.11 y su equivalente mensual de Q.62.20, considerando 5 días de operación por semana.

## B. Aplicación asignada al biogás generado por los prototipos:

De acuerdo a los datos experimentales de generación de los 3 prototipos, se definió que la generación de biogás era muy baja para asignarle una aplicación y sacarle provecho. Debido a que no se contaba con el dato exacto de la antigüedad de las aguas residuales con que se alimentó el Biodigestor, se pudo incurrir en un error al utilizar muestras que por su poco potencial de generación se estima que tenían mayor antigüedad que la requerida. Es por eso que para definir el tiempo y el uso de las aplicaciones se utilizará el valor teórico ajustado al factor de generación definido en la Tabla 8. De la generación diaria por Biodigestor, se tienen los siguientes valores:

- Control: 0.0897487 m<sup>3</sup> de biogás diarios
- Azúcar: 0.1076985 m<sup>3</sup> de biogás diarios
- Calor: 0.1346231 m<sup>3</sup> de biogás diarios

Si el biogás generado se utiliza en un quemador de 5cm de diámetro que posee una tasa de consumo de biogás de 0.32 m<sup>3</sup>/hora. Se puede hacer la conversión para determinar el potencial energético de dicho quemador, sabiendo que el biogás posee un potencial calorífico de 26,000kJ/m<sup>3</sup>, se puede inferir que el quemador genera un consumo energético de 2,311W/hora equivalente al calor que es transferido a los alimentos.

De acuerdo a la conversión energética del biogás, se puede establecer que por cada hora que se utilizara la hornilla sugerida, el equivalente monetario requerido para generar esa potencia sería: (2.311kW/hora)\*(1.557169Q/kWh) = Q.3.60/hora.

De acuerdo a las cotizaciones obtenidas, el quemador analizado tiene un costo aproximado de Q.314.00.

Ilustración 126: Estufa a base de biogás



[http://www.bombayharbor.com/Product/26865/Biogas\\_Stove\\_Single\\_Burner.html](http://www.bombayharbor.com/Product/26865/Biogas_Stove_Single_Burner.html)

A continuación se muestra una tabla que indica el tiempo que se podría utilizar el quemador basados en las tasas de generación diaria y el equivalente en quetzales de la energía producida cada mes:

**Tabla 71: Aplicación de quemador de 5 cm.**

Prototipo	Generación por Biodigestor (m <sup>3</sup> )/mes	Horas de uso por mes	Equivalente energético kWh	Equivalente monetario (Q.)
Azúcar	3.2310	10.097	23.334	36.33
Control	2.6925	8.414	19.445	30.28
Calor	4.0387	12.621	29.167	45.42

### C. Análisis de factibilidad financiera de quemador de 5 cm

Para el análisis de factibilidad financiera de los prototipos, se debe considerar que no se está tomando en cuenta la inversión de los Biodigestores, pues estos fueron fabricados para fines netamente educativos, de acuerdo a solicitud, del Departamento de Ingeniería Mecánica de la

Universidad. Se espera que la inversión sea recuperada como mínimo en dos años. La tasa de interés efectiva mensual correspondiente a la TMAR del proyecto es 0.643% mensual.

**1. Condiciones teóricas de generación.** Al analizar los ingresos obtenidos al utilizar el quemador de 5cm de diámetro basándonos en la generación teórica de biogás, la inversión del quemador y los costos mensuales reales de operación, se puede observar que no se requieren un análisis posterior para definir que con estos flujos de efectivo, no resulta factible la operación del Biodigestor, pues los costos de operación mensuales serán siempre mayores que los ingresos.

**Tabla 72: Resumen de inversión, costos e ingresos**

Detalle	Biodigestor #1	Biodigestor #2	Biodigestor #3
Inversión inicial	Q 314.00	Q 314.00	Q 314.00
Costos de operación mensual	Q 960.90	Q 930.10	Q 1,022.92
Ingresos mensuales	Q 36.33	Q 30.28	Q 45.42

Se puede establecer que los costos de operación mensuales son muy elevados para que en algún momento llegue a ser rentable la operación del Biodigestor, que debido a su potencial de generación registrará flujos de efectivo negativos. Los costos son mayores que los ingresos, por lo que no es económicamente viable el proyecto, simplemente, al observar los flujos de efectivo.

**2. Condiciones teóricas de generación con reducción en costos de operación.** De acuerdo a lo analizado en el inciso anterior, los altos costos de operación mensuales en relación a los ingresos no facilitaban la rentabilidad de operación del Biodigestor. Razón por la cual, se analizará un escenario en el que se eliminará el costo mensual de llenado, suponiendo que se reemplazará por un proceso manual de bombeo o traslado.

La generación de biogás y los ingresos mensuales que representan permanecerán sin cambio, por lo que el resumen de factores económicos correspondiente se presenta en la Tabla 73.

**Tabla 73: Resumen de inversión, costos modificados**

Detalle	Biodigestor #1	Biodigestor #2	Biodigestor #3
Inversión inicial	Q 314.00	Q 314.00	Q 314.00
Costos de operación mensual	Q 60.90	Q 30.10	Q 122.92
Ingresos mensuales	Q 36.33	Q 30.28	Q 45.42

Al analizar los nuevos flujos de efectivo, se puede observar que nuevamente se pueden eliminar la posibilidad de aplicar el uso del biogás generado en los prototipos de calor y azúcar para la operación del quemador, debido a que los costos continúan siendo más elevados que los ingresos, afectando la rentabilidad del proyecto.

Para el prototipo de control, se puede observar que este aun posee potencial para definir si la inversión se logra recuperar en un plazo igual o menor a 2 años, debido a que el ingreso de efectivo mensual de este Biodigestor es únicamente de Q.0.18 mensual, directamente se analizará si con la TMAR del proyecto y con un plazo de dos años, equivalente a 24 meses se logra recuperar la inversión. Para que se proceda con estudios adicionales, se debe cumplir la siguiente ecuación:  $VP \geq 0$

**Tabla 74: Análisis de VP**

Detalle	Control
Costo inicial	Q (314.00)
Costos de operación mensual	Q (30.10)
Ingresos mensuales	Q 30.28
i	0.643%
n	24
<b>VP</b>	<b>-313.790048</b>

Se determinó que el VP de los ingresos en un plazo de dos años no cumple con la prueba, pues el VP calculado con la TMAR es negativo, y en este proyecto se buscaba obtener un retorno de inversión dentro de un plazo de dos años. Nuevamente no resulta factible financieramente la implementación de ningún prototipo dados los flujos de efectivo en la aplicación estudiada.

**3. Condiciones teóricas de generación duplicadas con reducción en costos de operación.** Para este nuevo escenario se definió que la generación de biogás se duplica en comparación a la generación teórica y de igual manera se eliminan los costos de llenado de la fosa séptica, únicamente con el fin de determinar el comportamiento de los flujos de efectivo.

El resumen de inversión inicial, gastos e ingresos se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 75: Resumen de inversión (costos e ingresos modificados)**

Detalle	Biodigestor #1	Biodigestor #2	Biodigestor #3
Inversión inicial	Q 314.00	Q 314.00	Q 314.00
Costos de operación mensual	Q 60.90	Q 30.10	Q 122.92
Ingresos mensuales	Q 72.66	Q 60.56	Q 90.84

Nuevamente se puede excluir el prototipo de Biodigestor de calor de acuerdo al análisis de factibilidad financiera, en vista que los costos mensuales de operación son mayores que los ingresos mensuales que produce, el prototipo de calor queda eliminado como económicamente viable dado que sus costos > ingresos.

A continuación se realizará el análisis VP dada la TMAR, para los resultados registrados por los prototipos de control y de azúcar, para definir si el valor es mayor a cero. Se registran los siguientes resultados:

**Tabla 76: Análisis de VP**

TMAR= 0.643%	Biodigestor #1	Biodigestor #2	Biodigestor #3
VP	Q (53.25)	Q 361.39	Q (1,025.31)

De los resultados registrados en la Tabla 14 se determina que se puede continuar con el análisis de factibilidad del Biodigestor de control, sin embargo, el Biodigestor de azúcar queda eliminado, pues su VP no es mayor que 0 dada la TMAR.

Posteriormente se determinó la TIR del Biodigestor de control, analizando el periodo de 24 meses de recuperación de la inversión, con costos e ingresos uniformes, dando por resultado:  $TIR = 8.26\%$ . Dado que la  $TIR > TMAR$ , se define que el proyecto es económicamente viable.

En el caso que se diera la realidad de aumento en el volumen de generación de biogás y reducción en los costos de operación del Biodigestor, se recomienda optar por el Biodigestor de control, el cual representa un ahorro en la factura de consumo eléctrico de Q.60.56 mensuales, siendo un ahorro real mensual de Q.30.46, para la aplicación en estudio.

Resulta interesante analizar que para todos los escenarios planteados para los tres tipos de Biodigestores representados por los prototipos, la unidad más simple, siendo esta, la de control, resultó ser la única económicamente viable, mientras que las otras alternativas representaban más costos que ingresos debido a las modificaciones que se les realizaron.

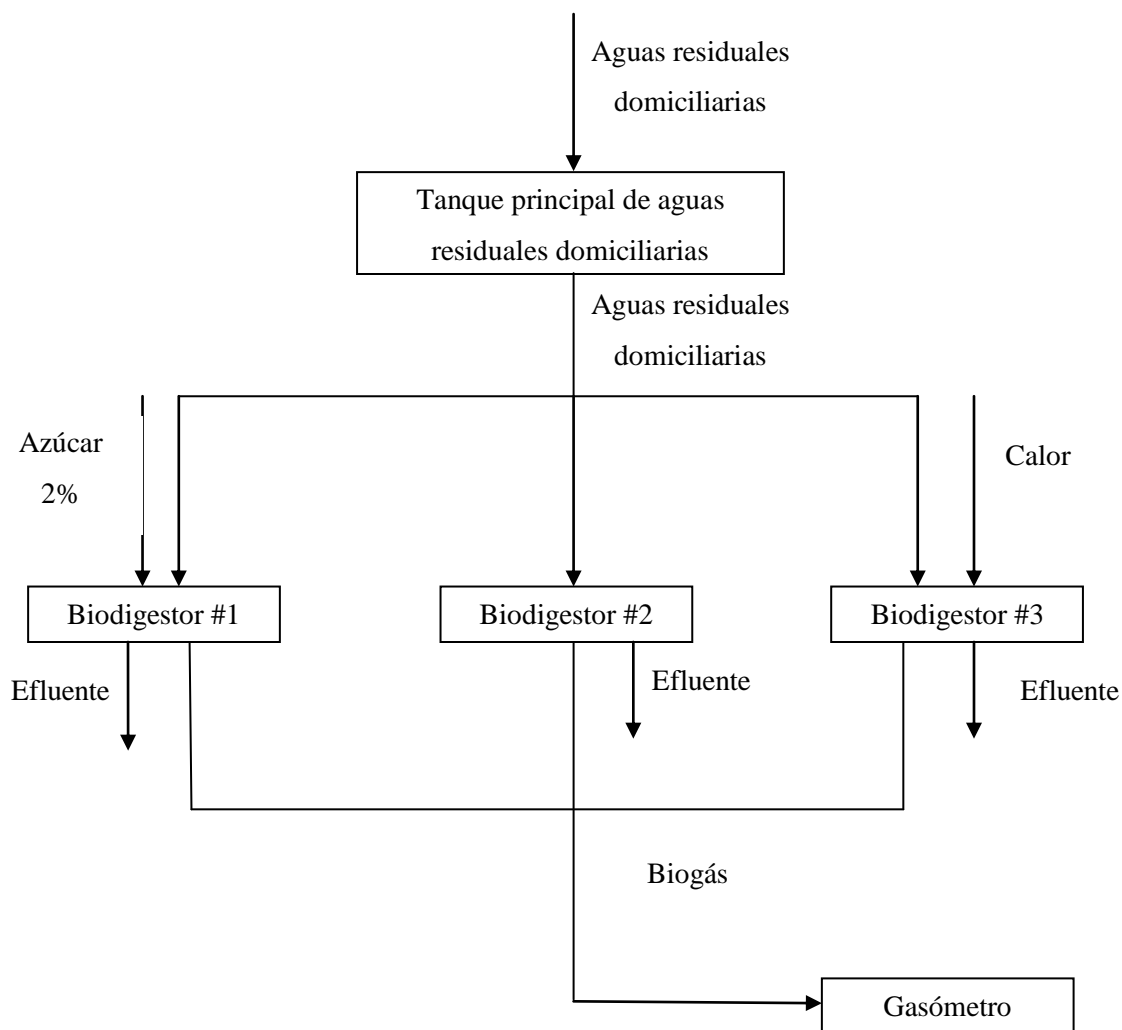
**Tabla 77: VP dados los n meses transcurridos**

n	VP dado "n" meses
0	(Q314.00)
1	(Q283.73)
2	(Q253.66)
3	(Q223.78)
4	(Q194.09)
5	(Q164.59)
6	(Q135.28)
7	(Q106.16)
8	(Q77.22)
9	(Q48.47)
10	(Q19.90)
11	Q8.49
12	Q36.69
13	Q64.72
14	Q92.56
15	Q120.23
16	Q147.72
17	Q175.04
18	Q202.18
19	Q229.14
20	Q255.94
21	Q282.56
22	Q309.02
23	Q335.30
24	Q361.42

Se definió la medida del tiempo en meses, para establecer el punto en el que se obtendría una utilidad neta del VPN y se determinó que a partir del mes 11 se alcanzaba utilidad, como se puede observar en la Tabla 77.

#### D. Diagrama general del proceso:

Ilustración 127: Diagrama de bloques del proceso



## E. Datos originales

Tabla 78: Mediciones diarias de presión de cada Biodigestor

Día	Fecha de medición	Presión (psi±0.1 psi)		
		Biodigestor #1 (Azúcar)	Biodigestor #2 (Control)	Biodigestor #3 (Calor)
1	9/26/2011	7.0	1.0	9.0
2	9/27/2011	6.2	1.2	7.8
3	9/28/2011	5.1	1.1	14.0
4	9/29/2011	3.6	1.5	7.2
5	9/30/2011	3.5	1.5	5.3
6	10/1/2011	2.7	1.5	3.5
8	10/3/2011	2.5	1.0	3.8
10	10/5/2011	2.5	0.0	2.0
11	10/6/2011	2.2	0.2	1.2
12	10/7/2011	2.3	0.7	1.3
15	10/10/2011	3.0	0.0	2.1
16	10/11/2011	1.6	0.0	0.7
17	10/12/2011	1.2	0.0	0.4
18	10/13/2011	1.4	0.0	0.7
19	10/14/2011	1.4	0.0	0.7
20	10/15/2011	1.0	0.0	0.5
22	10/17/2011	1.5	0.0	1.0
23	10/18/2011	1.2	0.2	0.1
24	10/19/2011	1.3	0.4	0.8
25	10/20/2011	0.7	0.2	0.7
26	10/21/2011	1.9	1.5	0.9
27	10/22/2011	2.3	1.5	0.7
29	10/24/2011	0.8	0.7	0.3
	<b>Promedio</b>	2.5	0.6	2.8
	<b>Desviación Estándar</b>	1.7	0.6	3.6

Ilustración 128: Presión (KPa) en cada día de medición para cada Biodigestor

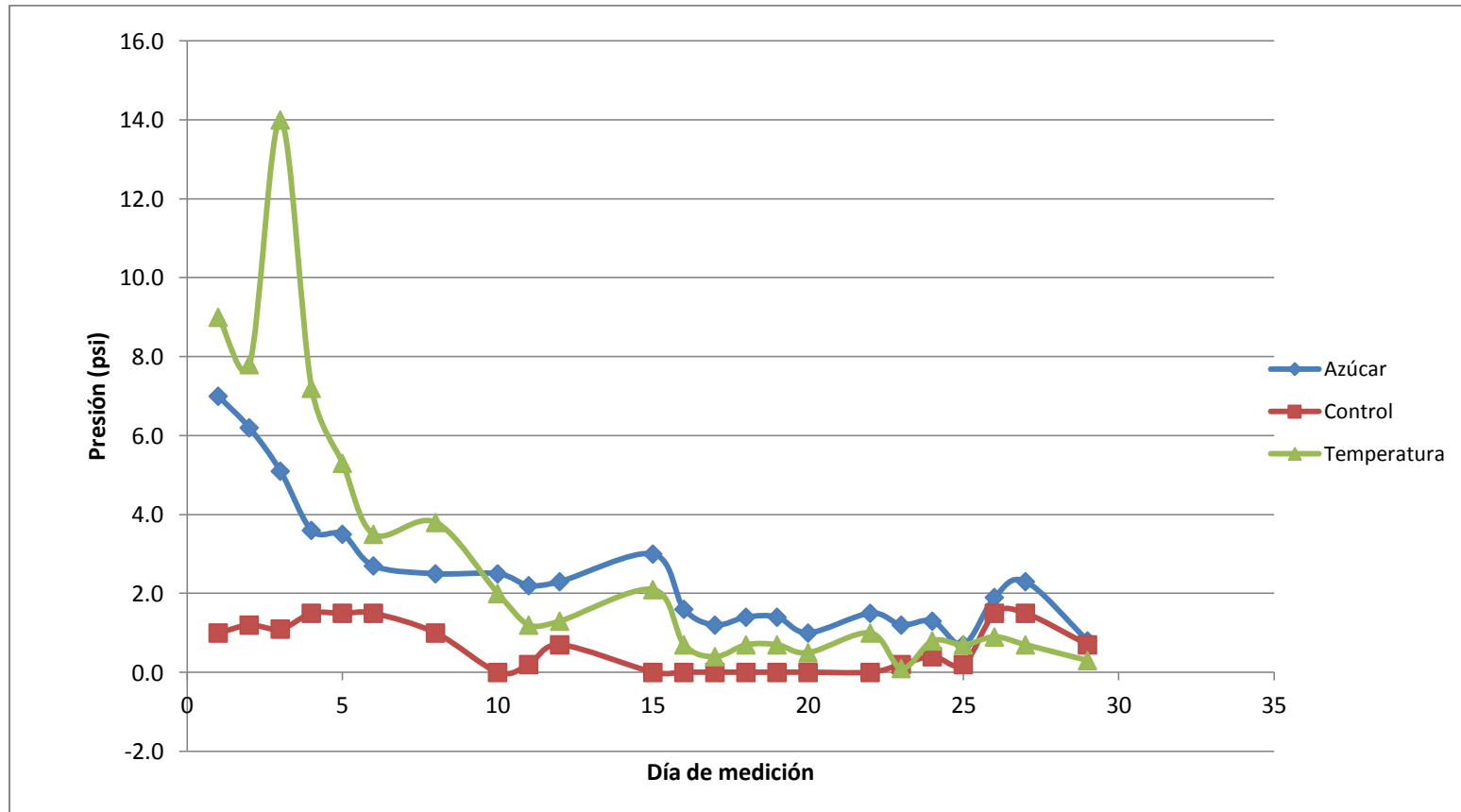


Tabla 79: Mediciones diarias de temperatura de cada Biodigestor

Día	Fecha de medición	Temperatura (°C±0.01°C)		
		Biodigestor #1 (Azúcar)	Biodigestor #2 (Control)	Biodigestor #3 (Calor)
1	9/26/2011	25.19	24.41	31.95
2	9/27/2011	23.1	22.17	30.93
3	9/28/2011	23.67	21.42	33.81
4	9/29/2011	22.32	21.51	35.3
5	9/30/2011	23.14	24.52	35.88
6	10/1/2011	22.42	23.12	36.31
8	10/3/2011	23.45	22.95	37.12
9	10/4/2011	24.43	23.15	37.54
10	10/5/2011	20.26	22.46	38.05
11	10/6/2011	24.94	26.76	40.07
12	10/7/2011	24.66	25.32	41.17
13	10/8/2011	25.51	23.14	39.91
15	10/10/2011	22.44	23.56	42.27
16	10/11/2011	19.35	22.54	42.35
17	10/12/2011	17.24	20.26	42.27
18	10/13/2011	13.72	22.46	42.12
19	10/14/2011	15.14	22.46	42.76
20	10/15/2011	17.56	21.39	42.24
22	10/17/2011	19.02	22.46	42.33
23	10/18/2011	19.16	22.46	42.53
24	10/19/2011	21.04	23.12	42.14
25	10/20/2011	20.85	22.15	41.16
26	10/21/2011	20.63	27.88	43.46
27	10/22/2011	20.67	29.07	43.43
29	10/24/2011	21.15	23.05	42.27
	<b>Promedio</b>	21.24	23.35	39.57
	<b>Desviación Estándar</b>	3.09	2.04	3.72

Ilustración 129: Temperatura (°C) durante cada día de medición para cada Biodigestor

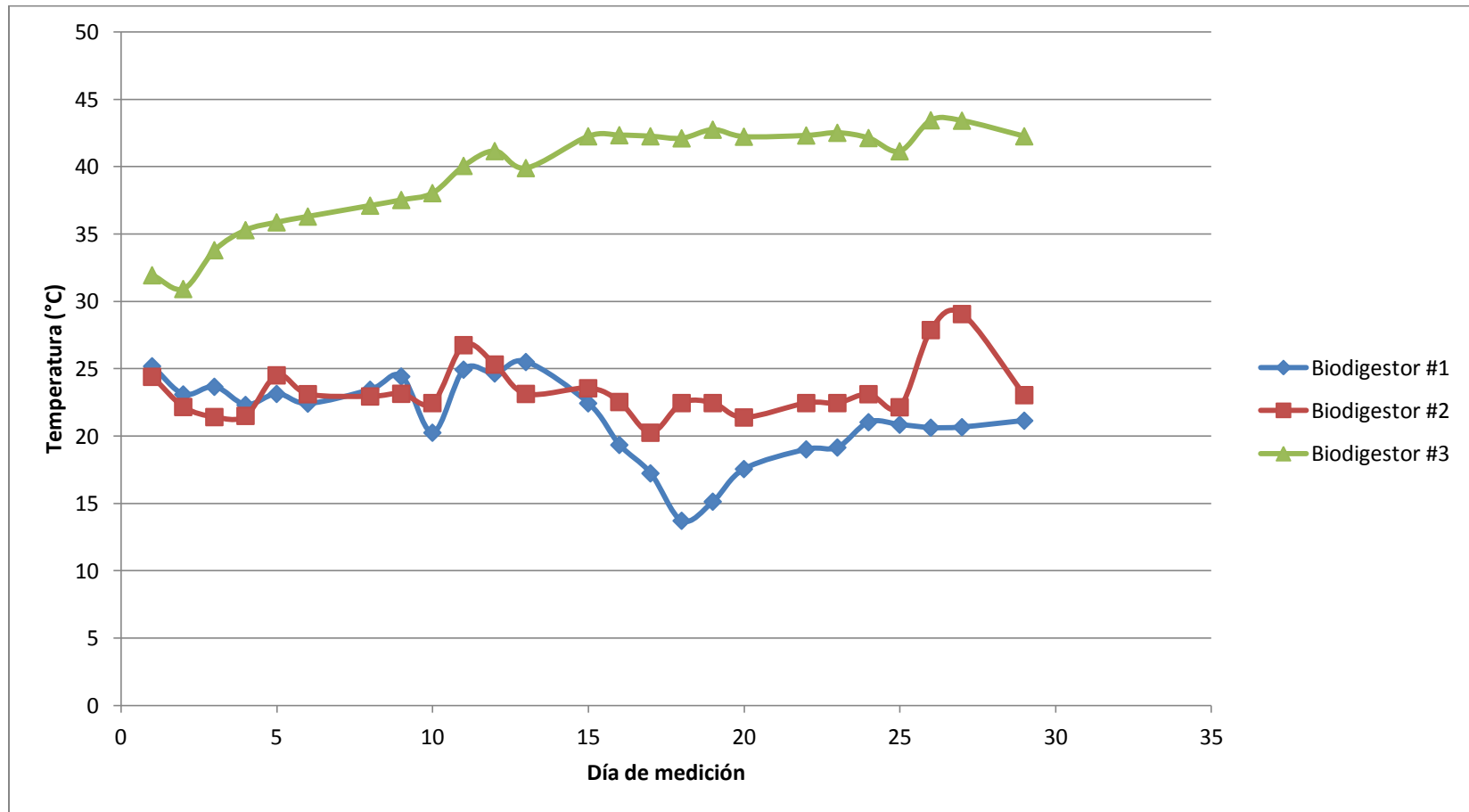


Tabla 80: Mediciones diarias de la altura del medidor del gasómetro

Día	Fecha de medición	Altura del gasómetro (cm±0.05cm)		
		Biodigestor #1 (Azúcar)	Biodigestor #2 (Control)	Biodigestor #3 (Calor)
1	9/26/2011	12.50	0.50	16.50
2	9/27/2011	10.00	1.20	20.50
3	9/28/2011	9.50	0.70	38.50
4	9/29/2011	1.50	0.40	15.80
5	9/30/2011	8.00	0.30	15.00
6	10/1/2011	4.80	0.50	6.00
8	10/3/2011	3.00	0.10	7.50
9	10/4/2011	3.50	0.00	6.50
10	10/5/2011	3.00	0.00	4.70
11	10/6/2011	2.00	0.00	5.00
12	10/7/2011	1.00	0.50	4.50
13	10/8/2011	4.00	0.30	3.00
15	10/10/2011	7.00	0.00	5.00
16	10/11/2011	2.00	0.00	3.00
17	10/12/2011	1.00	0.00	3.00
18	10/13/2011	1.50	0.30	0.70
19	10/14/2011	1.50	0.20	0.80
20	10/15/2011	3.00	0.40	0.50
22	10/17/2011	2.30	1.00	1.60
23	10/18/2011	3.40	2.10	0.90
24	10/19/2011	3.40	2.30	1.00
25	10/20/2011	3.20	2.20	1.50
26	10/21/2011	3.60	2.50	1.00
27	10/22/2011	5.50	2.10	1.50
29	10/24/2011	2.50	2.00	0.50

Tabla 81: Mediciones de pH cada tercer día

Día	Fecha de medición	pH ( $\pm 0.5$ )		
		Biodigestor #1 (Azúcar)	Biodigestor #2 (Control)	Biodigestor #3 (Calor)
<b>1</b>	9/26/2011	7.0	7.0	7.0
<b>3</b>	9/28/2011	7.0	7.0	7.0
<b>5</b>	9/30/2011	7.0	7.0	7.5
<b>8</b>	10/3/2011	7.0	7.5	7.0
<b>10</b>	10/5/2011	6.5	7.0	7.5
<b>12</b>	10/7/2011	6.5	7.5	7.5
<b>15</b>	10/10/2011	6.0	7.0	8.0
<b>17</b>	10/12/2011	6.0	8.0	8.0
<b>19</b>	10/14/2011	6.0	8.0	8.0
<b>22</b>	10/17/2011	5.0	8.5	8.5
<b>24</b>	10/19/2011	5.0	8.0	8.0
<b>26</b>	10/21/2011	5.0	8.0	8.0
<b>29</b>	10/24/2011	5.0	8.0	8.0
	<b>Promedio</b>	6.2	7.5	7.7
	<b>Desviación estándar</b>	0.8	0.5	0.5

**Tabla 82: Fecha de toma, de la primera y de la segunda medición para la determinación de DBO<sup>1</sup>**

<b>Muestra No.</b>	<b>Fecha de toma</b>	<b>Fecha de medición 1</b>	<b>Fecha de medición 2</b>
<b>1</b>	9/26/2011	9/28/2011	10/3/2011
<b>2</b>	9/28/2011	9/28/2011	10/3/2011
<b>3</b>	9/30/2011	9/30/2011	10/5/2011
<b>4</b>	10/3/2011	10/5/2011	10/10/2011
<b>5</b>	10/5/2011	10/5/2011	10/12/2011
<b>6</b>	10/7/2011	10/7/2011	10/12/2011
<b>7</b>	10/10/2011	10/12/2011	10/17/2011
<b>8</b>	10/12/2011	10/12/2011	10/17/2011
<b>9</b>	10/14/2011	10/14/2011	10/19/2011
<b>10</b>	10/17/2011	10/19/2011	10/24/2011
<b>11</b>	10/19/2011	10/19/2011	10/24/2011
<b>12</b>	10/21/2011	10/21/2011	10/26/2011
<b>13</b>	10/24/2011	10/26/2011	10/31/2011

<sup>1</sup> El formato de las fechas es: mes/día/año.

Tabla 83: Oxígeno disuelto el primero y el quinto día para cada muestra del Biodigestor #1

Volumen de muestra	8 mL $\pm$ 0.05 mL		6 mL $\pm$ 0.05 mL	
Muestra	Día 1 (mg O <sub>2</sub> /L)	Día 5 (mg O <sub>2</sub> /L)	Día 1 (mg O <sub>2</sub> /L)	Día 5 (mg O <sub>2</sub> /L)
1	7.51	0.08	7.43	0.26
2	8.66	0.77	8.67	0.98
3	7.42	0.34	7.55	0.47
4	7.46	0.22	7.47	0.29
5	7.09	0.23	7.36	0.22
6	7.56	0.61	7.43	0.32
7	7.25	0.92	7.33	0.76
8	7.23	1.02	7.43	1.11
9	7.52	1.15	7.39	1.09
10	7.63	1.27	7.22	1.17
11	7.23	1.32	7.33	1.45
12	7.32	1.35	7.49	1.56
13	7.23	1.65	7.22	1.68

Tabla 84: Oxígeno disuelto el primero y el quinto día para cada muestra del Biodigestor #2

Volumen de muestra	8 mL $\pm$ 0.05 mL		6 mL $\pm$ 0.05 mL	
Muestra	Día 1 (mg O <sub>2</sub> /L)	Día 5 (mg O <sub>2</sub> /L)	Día 1 (mg O <sub>2</sub> /L)	Día 5 (mg O <sub>2</sub> /L)
1	7.27	0.13	7.35	0.12
2	7.98	0.12	7.83	0.14
3	7.78	0.22	7.81	0.03
4	7.37	0.06	7.55	0.12
5	7.82	1.24	8.12	1.25
6	8.44	1.35	8.51	1.14
7	7.43	1.25	7.42	1.34
8	8.93	1.16	7.94	1.24
9	8.71	1.03	7.69	1.05
10	8.14	1.55	7.79	1.32
11	7.93	1.17	7.94	1.23
12	7.71	1.03	7.69	1.05
13	6.54	1.19	6.99	1.16

Tabla 85: Oxígeno disuelto el primero y el quinto día para cada muestra del Biodigestor #3

Volumen de muestra	8 mL $\pm$ 0.05 mL		6 mL $\pm$ 0.05 mL	
Muestra	Día 1 (mg O <sub>2</sub> /L)	Día 5 (mg O <sub>2</sub> /L)	Día 1 (mg O <sub>2</sub> /L)	Día 5 (mg O <sub>2</sub> /L)
1	7.21	0.08	7.27	0.06
2	7.42	0.1	7.7	0.15
3	7.95	0.67	7.98	0.55
4	7.75	0.94	7.83	0.88
5	7.63	0.97	7.45	0.92
6	7.89	1.41	7.70	1.55
7	7.35	1.59	7.32	1.66
8	7.08	1.61	7.14	1.72
9	7.71	1.51	7.34	1.86
10	7.25	1.71	7.97	2.06
11	7.08	1.74	7.16	1.73
12	7.24	1.66	7.34	1.98
13	7.05	1.67	7.02	1.91

Tabla 86: Masas iniciales y finales de muestra para la determinación de TS de cada Biodigestor

Lugar de toma de muestra	Muestra	Peso inicial (g $\pm$ 0.0001 g)	Peso final (g $\pm$ 0.0001 g)	Volumen (mL $\pm$ 0.05 mL)
Entrada 1, 2 y 3	1	32.9561	32.8246	7.00
	2	33.0892	32.9586	7.00
	3	32.8955	32.7536	7.00
Salida 1	1	31.9572	31.8889	7.00
	2	32.0081	31.9442	7.00
	3	31.9494	31.8924	7.00
Salida 2	1	31.9978	31.8962	7.00
	2	31.9530	31.8432	7.00
	3	32.0004	31.8984	7.00
Salida 3	1	32.2391	32.1605	7.00
	2	32.1986	32.1198	7.00
	3	32.1479	32.0591	7.00

## F. Cálculos de muestra

a. Cálculo de la masa de azúcar a agregar al Biodigestor #1: Se agregó un 2% de azúcar en masa al Biodigestor 1.

$$m_a * \%_{azúcar} = m_{azúcar}$$

### Ecuación 39. Cálculo de masa de azúcar en el Biodigestor #1

Donde  $m_a$  es la masa del afluente,  $\%_{azúcar}$  es el porcentaje en masa de azúcar que se desea agregar y  $m_{azúcar}$  es la masa de azúcar a agregar para lograr dicho porcentaje. Conociendo que el volumen del afluente a agregar al Biodigestor es de 196.500 L y suponiendo que su densidad es muy parecida a la del agua, se asume 1 L=1 kg, entonces:

$$196.500 \pm 0.0048 \text{ kg} * 2\% = 3.93 \pm 9.60 \times 10^{-4} \text{ kg de azúcar}$$

b. Cálculo de la masa de sólidos a la entrada o salida de cada Biodigestor: Conociendo los sólidos totales (TS) a la entrada o a la salida de cada Biodigestor se utiliza la siguiente fórmula:

$$V_x * TDS = m_{sólidos}$$

### Ecuación 40. Cálculo de la masa de sólidos

Donde  $V_x$  es el volumen del afluente o efluente (según sea el caso) en L,  $TDS$  es el promedio del contenido de sólidos totales en mg/L y  $m_{sólidos}$  es la masa de sólidos en el afluente o efluente.

Por ejemplo, para el cálculo de la masa de sólidos a la entrada de los Biodigestores:

$$196.500 \pm 0.0048 \text{ kg} * 19.24 \pm 0.90 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 3.78 \pm 1.76 \times 10^{-4} \text{ kg de sólidos}$$

El mismo cálculo se utilizó para determinar la masa de sólidos a la salida de cada Biodigestor.

c. Cálculo de la masa de líquidos a la entrada o salida de cada Biodigestor: Conociendo la masa de sólidos en el efluente o afluente, por diferencia se obtiene:

$$m_x - m_{sólidos} = m_{líquido}$$

### Ecuación 41. Cálculo de la masa de líquido

Donde  $m_x$  es la masa del efluente o afluente (según sea el caso),  $m_{sólidos}$  es la masa de sólidos y  $m_{líquido}$  es la masa de líquido. Todas las masas se midieron en kg.

Por ejemplo, para el cálculo de la masa de líquido en el afluente a la entrada de los Biodigestores:

$$196.500 \pm 0.048 \text{ kg} - 3.78 \pm 1.76 \times 10^{-4} = 192.72 \pm 8.98 \times 10^{-1}$$

De la misma manera se calculó la masa de líquidos a la salida de cada Biodigestor.

d. Cálculo de la masa de biogás generada: Conociendo el volumen de biogás generado y la proporción de los gases que lo componen, y utilizando la ecuación de los gases ideales con una temperatura y presión estándar; la masa de biogás se calculó de la siguiente manera:

$$\frac{\frac{P * V}{R * T} * (\%_{CH_4} m_{CH_4} + \%_{CO_2} m_{CO_2})}{1000} = M_{biogás}$$

#### Ecuación 42. Cálculo de la masa de biogás generado

Donde  $P$  es la presión estándar (1 atm),  $R$  es la constante de los gases (0.08206 atmL/molK),  $T$  es la temperatura estándar (298.15 K),  $V$  es el volumen acumulado de biogás generado durante los 29 días de retención en L,  $\%_X$  es el porcentaje de metano o dióxido de carbono en el biogás y  $m_X$  su masa molar en g/mol y  $M_{biogás}$  es la masa del biogás en kg.

Para el cálculo de la masa de biogás producido en el Biodigestor #1 se obtiene:

$$\frac{\frac{1 \text{ atm} * 102.216 \pm 0.258 \text{ L}}{0.08206 \frac{\text{atm} * \text{L}}{\text{mol} * \text{K}} * 298.15 \text{ K}} * \left( 60\% * 16 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 40\% * 44 \text{ g/mol} \right)}{1000} = 0.114 \pm 3.46 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

De la misma forma se calculó la masa de biogás producidos por el Biodigestor #2 y #3.

e. Cálculo de la masa de efluente: A partir de la masa de biogás y del afluente se calculó la masa del efluente por diferencia:

$$m_a - m_{biogás} = m_e$$

#### Ecuación 43. Cálculo de la masa del efluente

Donde  $m_a$  es la masa del afluente,  $m_{biogás}$  es la masa de biogás generado y  $m_e$  es la masa del efluente. Todas las masas se midieron en kg.

Por ejemplo, para el cálculo de la masa del efluente a la salida del Biodigestor #1:

$$196.500 \pm 0.048 \text{ kg} - 0.114 \pm 3.46 \times 10^{-3} \text{ kg} = 196.479 \pm 4.801 \times 10^{-2}$$

De la misma manera se calculó la masa de efluente a la salida de cada Biodigestor.

f. Cálculo de la masa de metano y dióxido de carbono a la salida de cada Biodigestor: A partir de las áreas relativas del cromatógrafo se obtiene un porcentaje promedio de metano y dióxido de carbono en el biogás. Entonces, para el cálculo de la masa de cada gas a la salida realiza:

$$\%_x * m_{biogás} = m_x$$

**Ecuación 44. Cálculo de la masa de metano y dióxido de carbono en el biogás**

Entonces, para el cálculo de la masa de metano en el Biodigestor #1 se tiene:

$$60\% * 0.114 \pm 3.46 \times 10^{-3} \text{ kg} = 0.068 \pm 2.079 \times 10^{-3} \text{ kg metano}$$

El mismo cálculo se realizó para la determinación de la masa de metano en los Biodigestores #2 y #3 y para la determinación de la masa de dióxido de carbono en los tres Biodigestores.

g. Cálculo del volumen de biogás generado: Para calcular el volumen de biogás generado cada día en cada Biodigestor se utilizó la siguiente fórmula que depende de altura del gasómetro (ver Módulo de Ingeniería Mecánica):

$$V = \frac{\pi * (0.003h^3 + 1.6625h^2 + 306.25h)}{1000}$$

Donde h es la altura que marca el gasómetro en cm y V es el volumen de biogás generado (en litros).

Por ejemplo, para calcular el volumen generado el día 1 en el Biodigestor #1, se tiene:

$$\begin{aligned} V &= \frac{\pi * (0.003(12.50 \text{ cm})^3 + 1.6625(12.50 \text{ cm})^2 + 306.25(12.50 \text{ cm}))}{1000} \\ &= 12.861 \text{ L de biogás} \end{aligned}$$

h. Cálculo de la demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ): Para realizar el cálculo del  $DBO_5$  se utiliza la Ecuación 3, descrita previamente en la sección de Antecedentes.

$$DBO_5 = \frac{(O_{2\text{inicial}} - O_{2\text{final}})}{(V_{\text{muestra}}/V_{\text{solución}})}$$

**Ecuación 45. Cálculo de DBO**

Por ejemplo, para la medición de  $DBO_5$  para la muestra 1 del Biodigestor #1:

$$DBO_5 = \frac{(7.51 - 0.08) \text{ mg/L}}{(8 \text{ mL}/300 \text{ mL})} = 278.63 \frac{\text{mg } O_2}{L}$$

El mismo cálculo se realizó para calcular el  $DBO_5$  de todas las muestras obtenidas cada tres días de cada uno de los Biodigestores.

i. Cálculo de la cantidad de sólidos totales (TS): Se utilizó la siguiente ecuación:

$$TS = \frac{m_h - m_s}{V}$$

**Ecuación 46. Cálculo de sólidos totales**

Donde  $TDS$  es la cantidad de sólidos totales en g/L,  $m_h$  es la masa de la muestra húmeda,  $m_s$  la masa de la muestra seca y  $V$  el volumen de la muestra en L.

Para el cálculo de los sólidos totales de la muestra 1 a la entrada del Biodigestor:

$$TS = \frac{32.9561g \pm 0.0001g - 32.8246g \pm 0.0001g}{0.00700 L \pm 0.00005 L} = 18.79 \pm 0.20 \text{ mg/L}$$

## G. Datos calculados

Tabla 87: DBO calculado para cada muestra del Biodigestor #1

Muestra No.	Muestra de 8 mL	Muestra de 6 mL	Promedio	Desviación estándar
	DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)		
1	278.63	358.50	318.56	56.48
2	295.88	384.50	340.19	62.67
3	265.50	354.00	309.75	62.58
4	271.50	359.00	315.25	61.87
5	257.25	357.00	307.13	70.53
6	260.63	355.50	308.06	67.09
7	237.38	328.50	282.94	64.44
8	232.88	316.00	274.44	58.78
9	238.88	315.00	276.94	53.83
10	238.50	302.50	270.50	45.25
11	221.63	294.00	257.81	51.18
12	223.88	296.50	260.19	51.35
13	209.25	277.00	243.13	47.91

Tabla 88: DBO calculado para cada muestra del Biodigestor #2

Muestra No.	Muestra de 8 mL	Muestra de 6 mL	Promedio	Desviación estándar
	DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)		
1	267.75	361.50	314.63	66.29
2	294.75	384.50	339.63	63.46
3	283.50	389.00	336.25	74.60
4	274.13	371.50	322.81	68.85
5	246.75	343.50	295.13	68.41
6	265.88	368.50	317.19	72.57
7	231.75	304.00	267.88	51.09
8	291.38	335.00	313.19	30.85
9	288.00	332.00	310.00	31.11
10	247.13	323.50	285.31	54.01
11	253.50	335.50	294.50	57.98
12	250.50	332.00	291.25	57.63
13	200.63	291.50	246.06	64.26

Tabla 89: DBO calculado para cada muestra del Biodigestor #3

Muestra No.	Muestra de 8 mL	Muestra de 6 mL	Promedio	Desviación estándar
	DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)		
1	267.38	360.50	313.94	65.85
2	274.50	377.50	326.00	72.83
3	273.00	371.50	322.25	69.65
4	255.38	347.50	301.44	65.14
5	249.75	326.50	288.13	54.27
6	243.00	307.50	275.25	45.61
7	216.00	283.00	249.50	47.38
8	205.13	271.00	238.06	46.58
9	232.50	274.00	253.25	29.34
10	207.75	295.50	251.63	62.05
11	200.25	271.50	235.88	50.38
12	209.25	268.00	238.63	41.54
13	201.75	255.50	228.63	38.01

Tabla 90: TS a la entrada de los Biodigestores

Muestra	TS (g/L)		
1	18.79	±	0.20
2	18.66	±	0.20
3	20.27	±	0.20
<b>Promedio (g/L)</b>	19.24		
<b>Desviación estándar (g/L)</b>	0.90		

Tabla 91: TS a la salida del Biodigestor #1

Muestra	TS (g/L)		
1	9.76	±	0.16
2	9.13	±	0.16
3	8.14	±	0.15
<b>Promedio (g/L)</b>	9.01		
<b>Desviación estándar (g/L)</b>	0.81		

Tabla 92: TS a la salida del Biodigestor #2

Muestra	TS (g/L)		
1	14.51	±	0.18
2	15.69	±	0.18
3	14.57	±	0.18
<b>Promedio (g/L)</b>	14.92		
<b>Desviación estándar (g/L)</b>	0.66		

Tabla 93: TS a la salida del Biodigestor #3

Muestra	TS (g/L)		
1	11.23	±	0.16
2	11.26	±	0.16
3	12.69	±	0.17
<b>Promedio (g/L)</b>	11.72		
<b>Desviación estándar (g/L)</b>	0.83		

Tabla 94: Volumen de biogás generado diario, acumulado y promedio en cada Biodigestor

Día	Fecha de medición	Volumen del biogás (L±0.048L)		
		Biodigestor #1 (Azúcar)	Biodigestor #2 (Control)	Biodigestor #3 (Calor)
1	9/26/2011	12.861	0.482	17.339
2	9/27/2011	10.153	1.162	21.999
3	9/28/2011	9.620	0.676	45.321
4	9/29/2011	1.455	0.386	16.542
5	9/30/2011	8.036	0.289	15.639
6	10/1/2011	4.740	0.482	5.963
8	10/3/2011	2.934	0.096	7.514
9	10/4/2011	3.432	0.000	6.477
10	10/5/2011	2.934	0.000	4.638
11	10/6/2011	1.945	0.000	4.942
12	10/7/2011	0.967	0.482	4.436
13	10/8/2011	3.933	0.289	2.934
15	10/10/2011	6.994	0.000	4.942
16	10/11/2011	1.945	0.000	2.934
17	10/12/2011	0.967	0.000	2.934
18	10/13/2011	1.455	0.289	0.676
19	10/14/2011	1.455	0.193	0.773
20	10/15/2011	2.934	0.386	0.482
22	10/17/2011	2.241	0.967	1.553
23	10/18/2011	3.332	2.044	0.870
24	10/19/2011	3.332	2.241	0.967
25	10/20/2011	3.133	2.142	1.455
26	10/21/2011	3.532	2.438	0.967
27	10/22/2011	5.451	2.044	1.455
29	10/24/2011	2.438	1.945	0.482
<b>Total</b>		102.216	19.033	174.235
<b>Promedio</b>		4.089	0.761	6.969
<b>Desviación Estándar</b>		3.116	0.847	10.006

## H. Cromatogramas

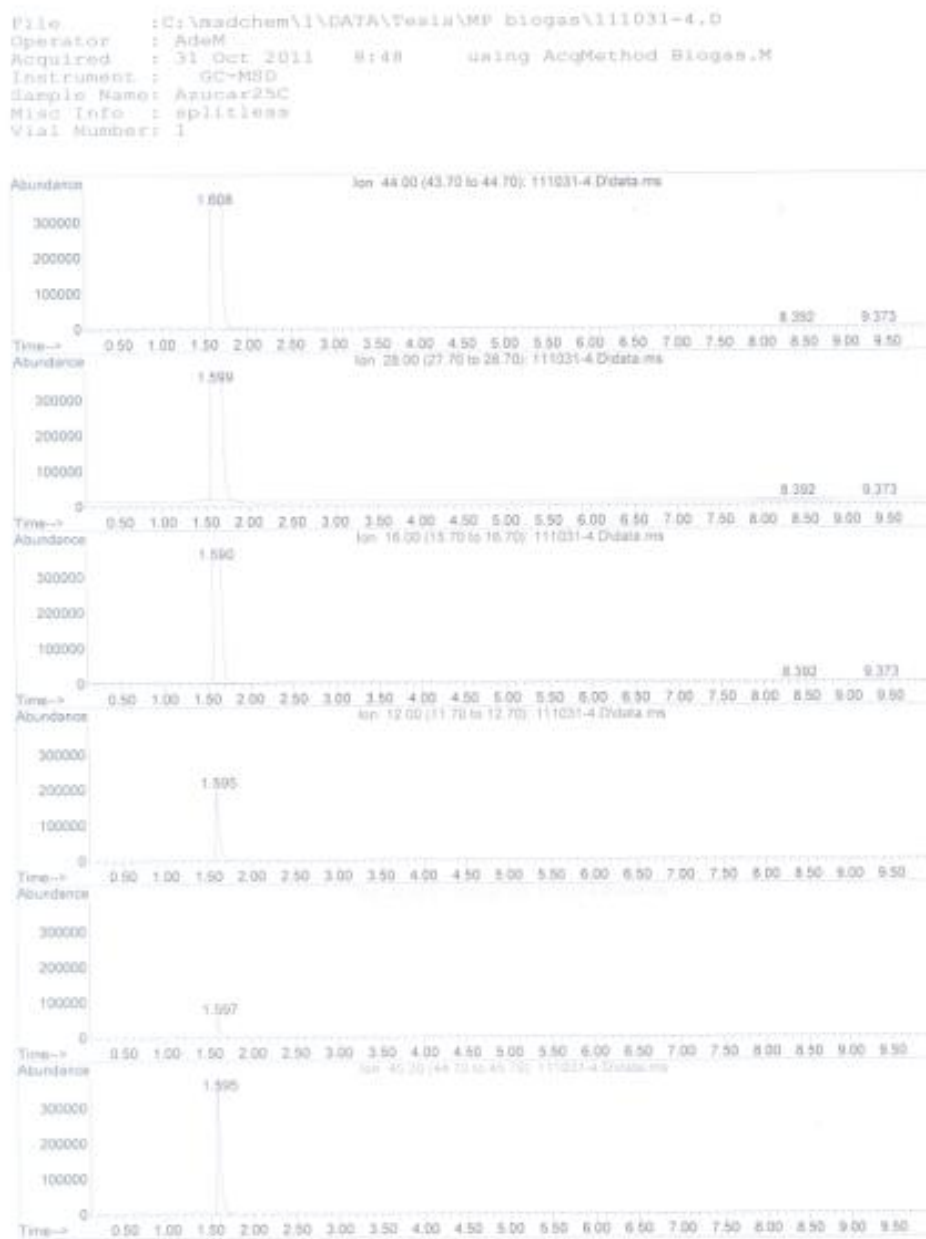
Ilustración 130: Iones característicos de CO<sub>2</sub> en la muestra de biogás

Ilustración 131: Búsqueda de Iones característicos de CH<sub>4</sub> en la muestra de biogás

File :C:\msdchem\1\DATA\Tesis\MP biogas\111031-4.D  
Operator : AdeM  
Acquired : 31 Oct 2011 8:48 using AcqMethod Biogas.M  
Instrument : GC-MSD  
Sample Name: Azucar25C  
Misc Info : splitless  
Vial Number: 1

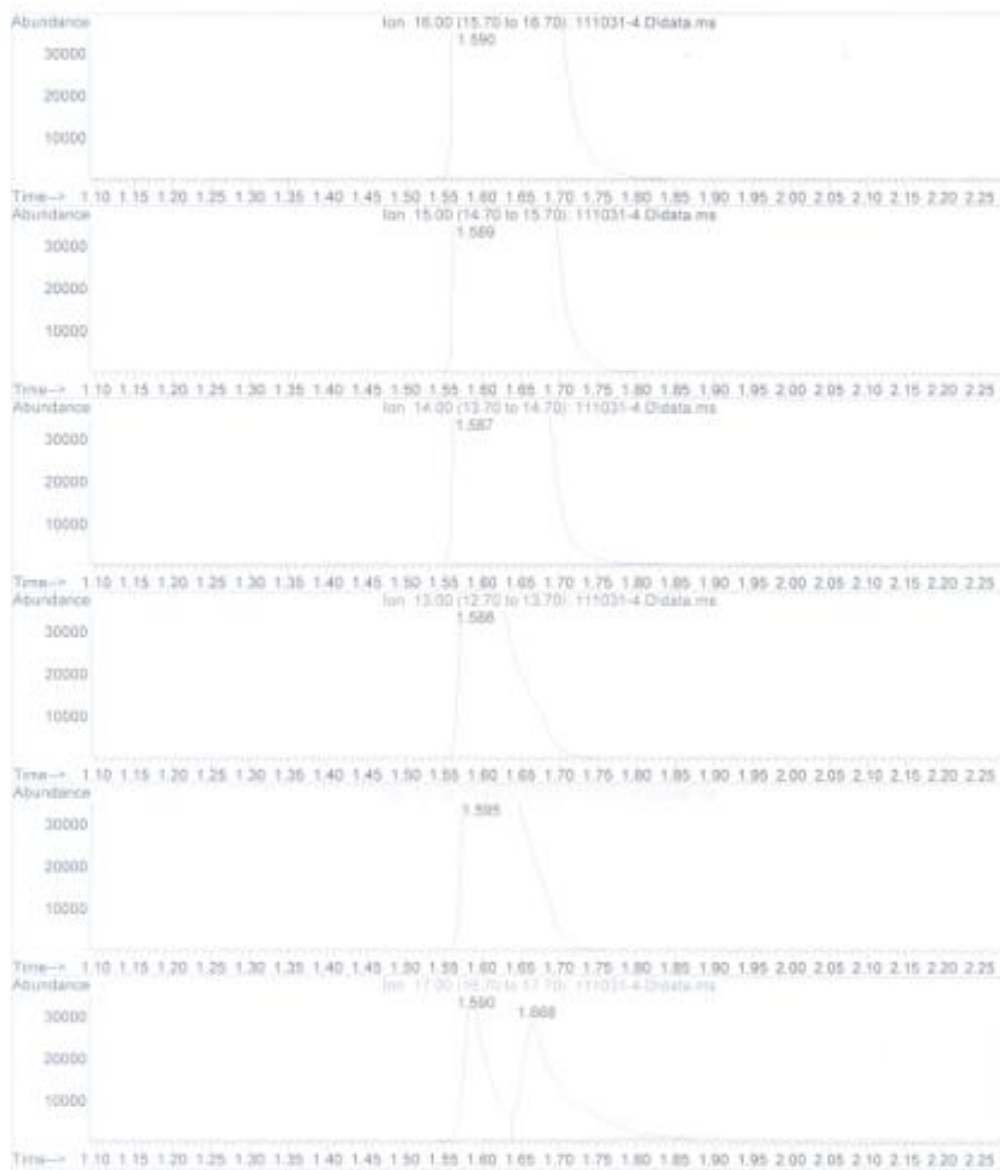
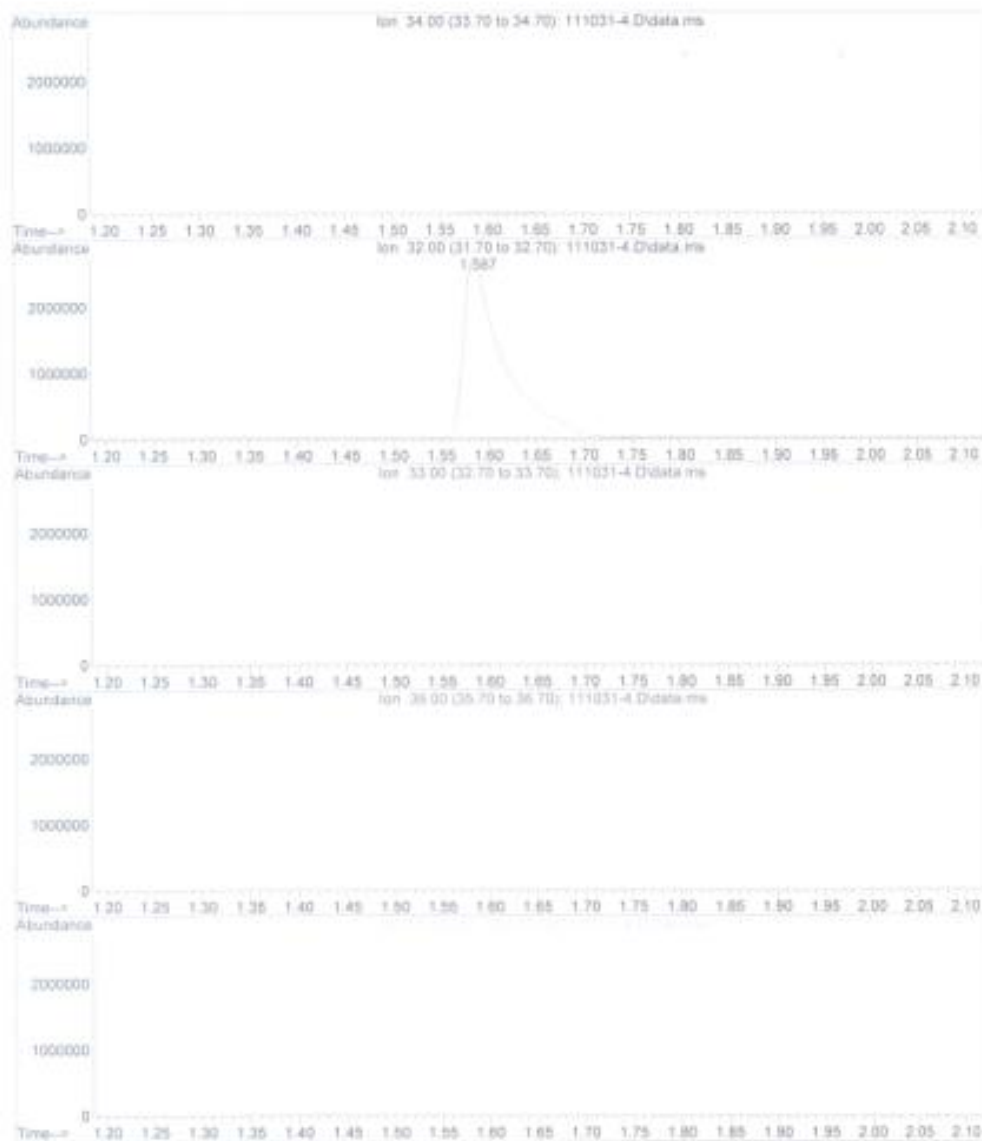


Ilustración 132: Búsqueda de Iones característicos de H<sub>2</sub>S en la muestra de biogás

File : C:\msdchem\1\DATA\Tesis\MP biogas\111031-4.D  
Operator : Adem  
Acquired : 31 Oct 2011 8:48 using AcqMethod Biogas.M  
Instrument : GC-MSD  
Sample Name: Azucar25C  
Misc Info : splitted.ms  
Vial Number: 1



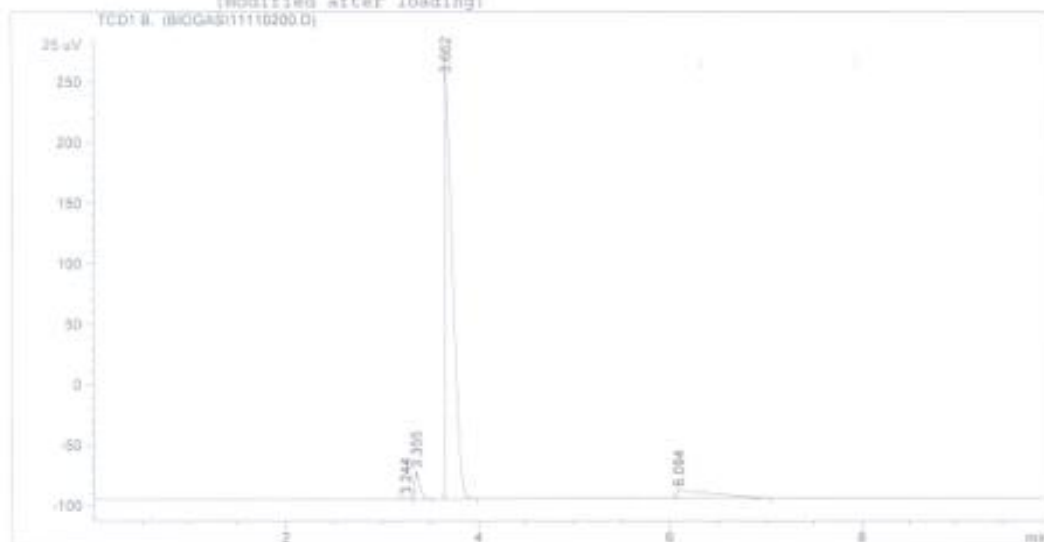
**Ilustración 133: Cromatograma de la muestra de biogás del Biodigestor #1 con el detector TCD**

Data File C:\NFCHEM\1\DATA\BIOGAS\11110200.D Sample Name: Azucres-1

```

=====
Injection Date : 11/2/2011 9:20:01 AM
Sample Name : Azucres-1 Location : Vial 1
Acq. Operator : AdeM Inj : 1
Acq. Instrument : Instrument 1 Inj Volume : Manually
Acq. Method : C:\NFCHEM\1\METHODS\BIOGAS.M
Last changed : 11/2/2011 8:58:18 AM by AdeM
Analysis Method : C:\NFCHEM\1\METHODS\BIOGAS.M
Last changed : 11/2/2011 11:25:15 AM by AdeM
(modified after loading)
=====

```



=====  
Area Percent Report  
=====

```

Sorted By : Signal
Multiplier : 1.0000
Dilution : 1.0000
Sample Amount : 1.00000 [ng/ul] (not used in calc.)
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

```

Signal 1: TCD1 B,

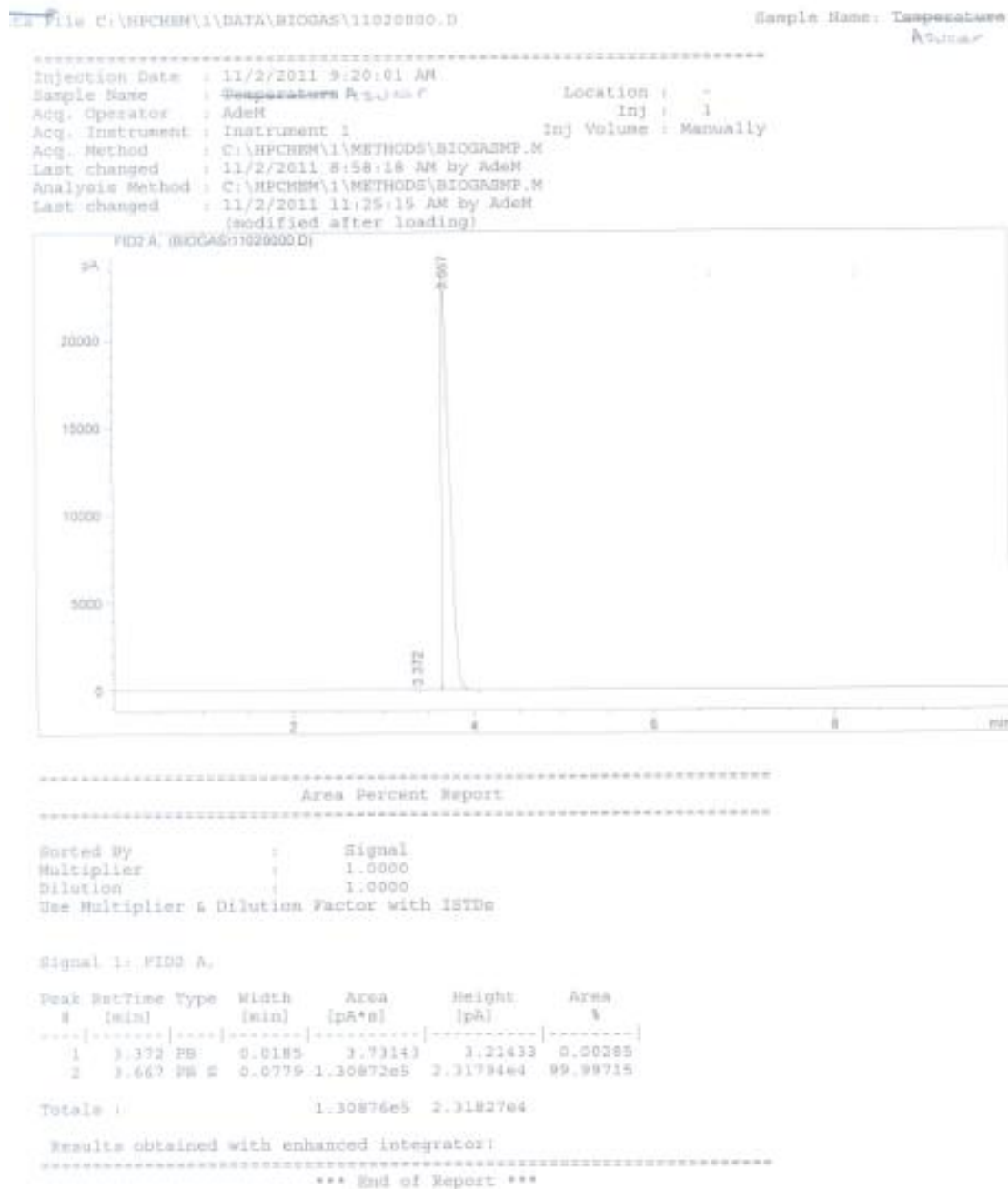
Peak #	RetTime (min)	Type	Width (min)	Area [25 uV*s]	Height [25 uV]	Area %
1	3.244	BV	0.0548	1.47666	1.53197e-1	0.06661
2	3.355	VB	0.0433	69.18720	22.22727	3.12081
3	3.662	BB	0.0709	1978.07739	361.42682	89.22463
4	6.094	BB	0.3290	168.22214	6.19141	7.58795

Totals : 2216.96339 390.19870

Results obtained with enhanced integrator!

=====  
\*\*\* End of Report \*\*\*

Ilustración 134: Cromatograma de la muestra de biogás del Biodigestor #1 con el detector FID



**Ilustración 135: Cromatograma de la muestra de biogás del Biodigestor #2 con el detector TCD**

Data File C:\HPCHEM\1\DATA\BIOGAS\11110202.D

Sample Name: Control

```

=====
Injection Date : 11/2/2011 10:00:13 AM
Sample Name    : Control                      Location : Vial 1
Acq. Operator : AdeM                          Inj : 1
Acq. Instrument : Instrument 1                Inj Volume : Manually
Acq. Method    : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGASHP.M
Last changed   : 11/2/2011 8:58:18 AM by AdeM
Analysis Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGASHP.M
Last changed   : 11/2/2011 11:25:15 AM by AdeM
                (modified after loading)
=====
  
```



Area Percent Report

```

=====
Sorted By      : Signal
Multiplier     : 1.0000
Dilution       : 1.0000
Sample Amount  : 500.00000 [ng/ul] (not used in calc.)
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs
=====
  
```

Signal 1: TCD1 B.

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [25 uV*s]	Height [25 uV]	Area %
1	3.354	BB	0.0454	80.67069	24.49603	4.14356
2	3.668	BB	0.0711	1768.21035	321.89285	90.82110
3	6.270	BB	0.2659	97.99193	4.43344	5.03334

Totals : 1946.89497 350.82232

Results obtained with enhanced integrator:

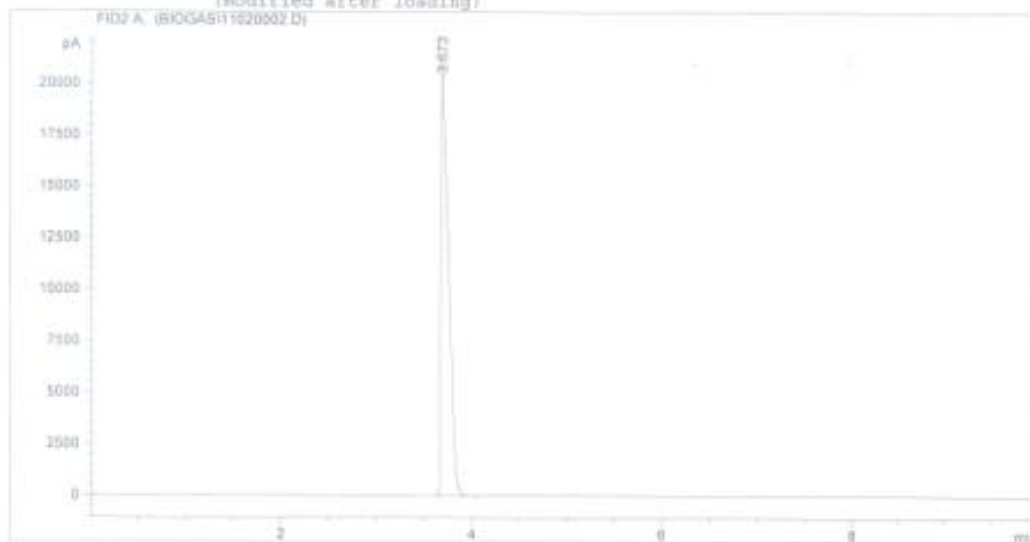
\*\*\* End of Report \*\*\*

**Ilustración 136: Cromatograma de la muestra de biogás del Biodigestor #2 con el detector FID**

Data File C:\HPCHEM\1\DATA\BIOGAS\11020002.D Sample Name: Control

```

-----
Injection Date : 11/2/2011 10:00:13 AM
Sample Name : Control Location : -
Acq. Operator : Adem Inj : 1
Acq. Instrument : Instrument 1 Inj Volume : Manually
Acq. Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS\M.P.M
Last changed : 11/2/2011 8:58:18 AM by Adem
Analysis Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS\M.P.M
Last changed : 11/2/2011 11:25:15 AM by Adem
(modified after loading)
  
```



-----  
 Area Percent Report  
 -----

```

Sorted By : Signal
Multiplier : 1.0000
Dilution : 1.0000
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs
  
```

Signal 1: FID2 A,

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [pA*s]	Height [pA]	Area %
1	3.673	PS S	0.0720	1.16842e5	2.09827e4	1.000e2

Totals : 1.16842e5 2.09827e4

Results obtained with enhanced integrator!

-----  
 \*\*\* End of Report \*\*\*  
 -----

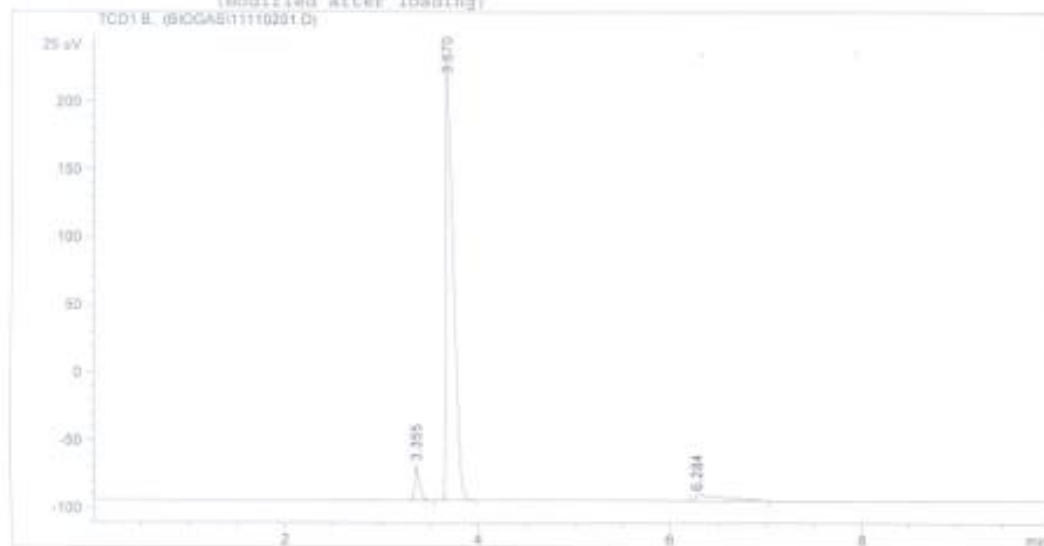
## Ilustración 137: Cromatograma de la muestra de biogás del Biodigestor #3 con el detector TCD

Data File C:\HPCHRM\1\DATA\BIOGAS\11110201.D Sample Name: Temperatura

```

=====
Injection Date : 11/2/2011 9:34:20 AM
Sample Name : Temperatura Location : Vial 1
Acq. Operator : AdeM Inj : 1
Acq. Instrument : Instrument 1 Inj Volume : Manually
Acq. Method : C:\HPCHRM\1\METHODS\BIOGAS.M
Last changed : 11/2/2011 8:58:18 AM by AdeM
Analysis Method : C:\HPCHRM\1\METHODS\BIOGAS.M
Last changed : 11/2/2011 11:25:15 AM by AdeM
              (modified after loading)
=====

```



```

=====
Area Percent Report
=====

```

```

Sorted By : Signal
Multiplier : 1.0000
Dilution : 1.0000
Sample Amount : 500.00000 [ng/ul] (not used in calc.)
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

```

Signal 1: TCD1 B.

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [25 uV*s]	Height [25 uV]	Area %
1	3.355	PB	0.0451	84.99341	25.99453	4.54257
2	3.670	BB	0.0654	1688.43518	326.14421	90.24035
3	6.284	PB	0.2658	97.61369	4.46930	5.21708

```
Totals : 1871.04228 356.80804
```

Results obtained with enhanced integrator:

```

=====
*** End of Report ***
=====

```

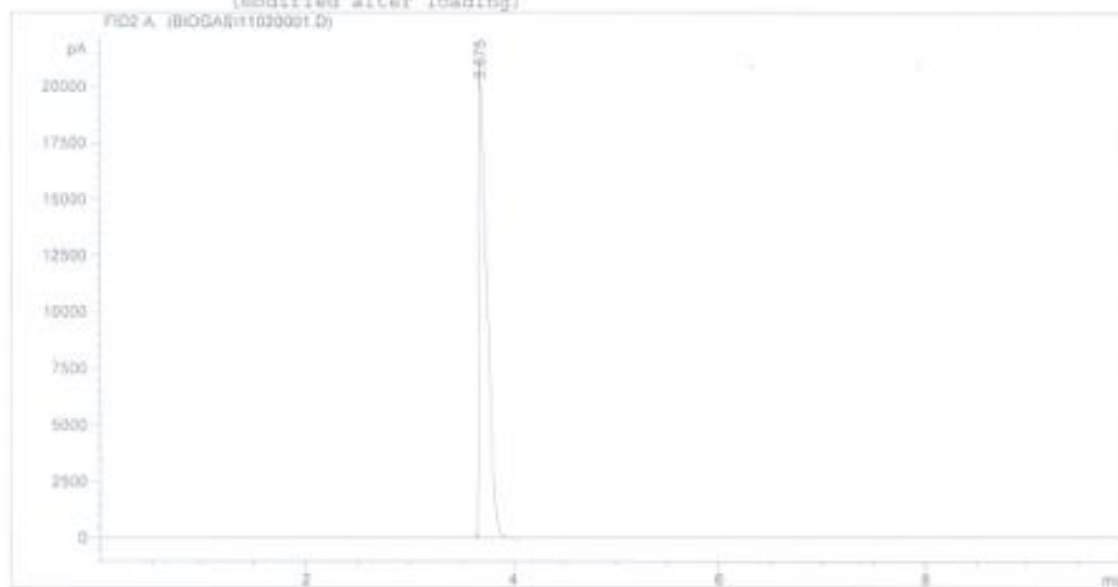
Ilustración 138: Cromatograma de la muestra de biogás del Biodigestor #3 con el detector FID

Data File C:\HPCHEM\1\DATA\BIOGAS\11020001.D Sample Name: Temperatura

```

=====
Injection Date : 11/2/2011 9:34:20 AM
Sample Name : Temperatura Location : -
Acq. Operator : Adem Inj : 1
Acq. Instrument : Instrument 1 Inj Volume : Manually
Acq. Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS\M.P.M
Last changed : 11/2/2011 9:58:18 AM by Adem
Analysis Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS\M.P.M
Last changed : 11/2/2011 11:25:15 AM by Adem
(modified after loading)
=====

```



=====  
Area Percent Report  
=====

```

Sorted By : Signal
Multiplier : 1.0000
Dilution : 1.0000
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

```

Signal 1: FID2 A.

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [pA*s]	Height [pA]	Area %
1	3.575	PR S	0.0709	1.11403e5	2.06767e4	1.000e2

Totals : 1.11403e5 2.06767e4

Results obtained with enhanced integrator!

=====  
\*\*\* End of Report \*\*\*

**Ilustración 139: Pico observado por el análisis de estándar de CO2 con el detector TCD**

File: C:\HPCHEM\1\DATA\BIOGAS\11110203.D

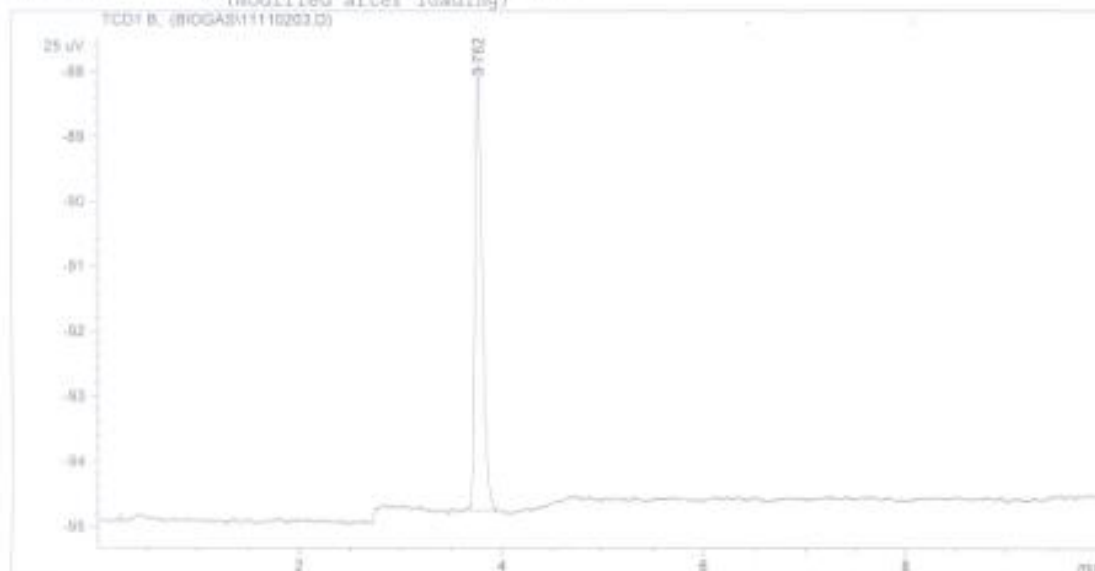
Sample Name: CO2

Valvula

```

=====
Injection Date : 11/2/2011 10:53:11 AM
Sample Name    : CO2                      Location : Vial 1
Acq. Operator  : AdeM                      Inj : 1
Acq. Instrument : Instrument 1             Inj Volume : Manually
Acq. Method    : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS\M.M
Last changed   : 11/2/2011 10:52:20 AM by AdeM
Analysis Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\BIOGAS\M.M
Last changed   : 11/2/2011 11:25:19 AM by AdeM
                  (modified after loading)
=====

```



Area Percent Report

```

=====
Sorted By      : Signal
Multiplier     : 1.0000
Dilution       : 1.0000
Sample Amount  : 500.00000 (ng/ul) (not used in calc.)
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs
=====

```

Signal 1: TCD1 B,

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [25 uV*s]	Height [25 uV]	Area %
1	3.762	BB	0.0774	34.61109	6.91680	1.000e2

Totals :                    34.61109    6.91680

Results obtained with enhanced integrator!

\*\*\* End of Report \*\*\*