



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

## FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO  
EXPERIMENTAL QUE PERMITA ESTUDIAR LA  
GENERACIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE MATERIA  
ORGÁNICA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A N:**

**JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE**

**LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA**

**ASESOR:**

**DR. VÍCTOR HUGO HERNÁNDEZ GÓMEZ**

Cuautitlán Izcalli, Estado de México, 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN  
**ASUNTO: VOTO APROBATORIO**

**M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE**

**ATN: M. en A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos **La Tesis:**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO EXPERIMENTAL QUE PERMITA ESTUDIAR LA  
GENERACIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE MATERIA ORGÁNICA”**

Que presenta el pasante: **JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE**  
Con número de cuenta: **40803859-9** para obtener el Título de: **Ingeniero Mecánico Eléctricista**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**  
**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU”**  
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 04 de Julio de 2014.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	Ing. Juan R. Garibay Bermudez	
<b>VOCAL</b>	Ing. Guillermo Santos Olmos	
<b>SECRETARIO</b>	Dr. Víctor H. Hernández Gómez	
<b>1er SUPLENTE</b>	M.A.I. Pedro Guzmán Tinajero	
<b>2do SUPLENTE</b>	Ing. Alberto Cruz Osnaya	

NOTA: Los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).  
En caso de que algún miembro del jurado no pueda asistir al examen profesional deberá dar aviso por anticipado al departamento.  
(Art 127 REP)

IHM/yrf



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN  
**ASUNTO: VOTO APROBATORIO**

**M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE**

**ATN: M. en A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautilán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos **La Tesis:**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO EXPERIMENTAL QUE PERMITA ESTUDIAR LA  
GENERACIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE MATERIA ORGÁNICA”**

Que presenta el pasante: **LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA**

Con número de cuenta: **40800529-0** para obtener el Título de: **Ingeniero Mecánico Eléctricista**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**  
**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU”**  
Cuautilán Izcalli, Méx. a 04 de Julio de 2014.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	Ing. Juan R. Garibay Bermudez	
<b>VOCAL</b>	Ing. Guillermo Santos Olmos	
<b>SECRETARIO</b>	Dr. Víctor H. Hernández Gómez	
<b>1er SUPLENTE</b>	M.A.I. Pedro Guzmán Tinajero	
<b>2do SUPLENTE</b>	Ing. Alberto Cruz Osnaya	

NOTA: Los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

En caso de que algún miembro del jurado no pueda asistir al examen profesional deberá dar aviso por anticipado al departamento.  
(Art 127 REP)

IHM/yrf

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, por su enorme cariño, compañía, consejos e innumerables sacrificios que han realizado por mí durante todos estos años.

A mis hermanas, que a pesar de todo, siempre han estado para brindarme su ayuda.

A mis sobrinos, por alegrarme cada día con su presencia.

A mi familia, por su apoyo y compañía durante los buenos y malos momentos.

A mis amigos, por los buenos momentos que he pasado en compañía de ustedes.

Para mis profesores, por haberme brindado su tiempo y sus conocimientos.

A los compañeros del Laboratorio de investigación en energías renovables, por el apoyo otorgado para la terminación de este proyecto.

A Roberto González Maya, por su apoyo durante la elaboración de esta tesis.

Al M. en I. Noé A. Cortez y al M. en I. Juan J. García por su ayuda en la realización de la prueba de tensión en el CAT de la FESC.

Al Dr. Víctor Hugo Hernández Gómez, por su colaboración y consejos en el desarrollo de esta tesis.

Para la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán por brindarme la oportunidad de aprender y superarme.

**Jesús Rafael González Aguirre**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, Pioquinto González Santos, María del Carmen Maya Bautista, por el apoyo brindado y el ejemplo inculcado a lo largo de mi vida.

A mi hermana, Beatriz González Maya, por los buenos y malos momentos compartidos.

A mi abuelita, Elvia Bautista Flores, por los consejos que me han guiado hasta este día.

A mis tías, Sandra Lucía Maya Bautista, Wendy Linares, porque, aun en la distancia fueron grandes motivadoras.

A la Srta. Carolina Pimentel Sánchez, por ser un ejemplo de superación y perseverancia digna de mi admiración.

A mi compañero de tesis, Rafael González Aguirre, por el apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto.

A mi asesor de tesis, Dr. Víctor Hugo Hernández Gómez, por poner al alcance todos los medios posibles para llevar a cabo este proyecto.

A mis compañeros de laboratorio, Marco Antonio Martínez Ávila, Omar Armando Cornejo Becerra, Omar Olvera García, por la amistad que se forjó en el día a día y por haber sido participes de este proyecto.

Al M. en I. Noé A. Cortez y al M. en I. Juan J. García por su ayuda en la realización de la prueba de tensión en el CAT de la FESC.

**Luis Roberto González Maya**

**Investigación realizada gracias al Programa  
UNAM-DGAPA-PAPIIT-IT104212-2**

**Agradecemos a la  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
por el apoyo recibido durante la realización de esta Tesis**

**Proyecto realizado gracias al programa  
UNAM-DGAPA-PAPIME-PE101912**

**Agradecemos a la  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
por el apoyo recibido durante la realización de esta Tesis**

## RESUMEN

La problemática generada por la alta producción de desechos orgánicos, lleva a la necesidad de buscar alternativas para su correcto manejo y aprovechamiento, los biodigestores son dispositivos que pueden solventar esta problemática, dado que además de recuperar el biogás obtenido por la descomposición de la materia orgánica, evitando con ello que el metano escape a la atmosfera e influya en el calentamiento global; el residuo resultante sirve como un excelente fertilizante. En el presente trabajo se pretende contribuir en el estudio de estos sistemas para ayudar a entender su comportamiento y con ello lograr explotar de una forma más eficiente esta alternativa.

Para la elaboración de los prototipos decidimos basarnos en el biodigestor tipo Batch, el cual consto de dos partes (una tapa y un cuerpo), teniendo un volumen total de 33 litros y una presión de operación de 7 psi. Para tener una comparación de diferentes tipos de materia orgánica a diferentes grados de dilución y conocer cual presenta la mayor producción de biogás con la concentración más alta de metano, fabricamos 12 biodigestores, empleando como materiales para su elaboración resina de poliéster ortoftálica, gel-coat ortoftálico e isoftálico y fibra de vidrio. Además fueron instrumentados para tener la posibilidad de medir la presión, la temperatura y pH del sustrato, esto nos permitió observar el comportamiento de diferentes biomasas, con diferentes grados de dilución, durante el proceso de fermentación anaeróbica.

Durante la elaboración del proyecto realizamos dos pruebas, la primera fue de 84 días y la segunda de 96 días, en ambas se trabajó con los 12 biodigestores simultáneamente y con cinco diferentes tipos de materia orgánica en cada prueba, durante ellas se tomaron lecturas de presión, temperatura, pH y pruebas con un analizador de gases para conocer el porcentaje de metano.

De los datos obtenidos destacamos que el excremento de conejo es el que presenta la mayor producción de biogás y alcanza los porcentajes más altos de metano que son en algunos casos mayores al 70%. El excremento de ganado vacuno también presentó una buena producción de biogás en ambas pruebas y alcanzó porcentajes de metano muy cercanos a los de excremento de conejo. En la segunda prueba la producción de biogás en litros por kilogramo de estiércol máxima fue de 0.708 lt/kg de excremento de conejo y 0.26 lt/kg de excremento de vaca. Algunas materias orgánicas como la poda de pastos y los desechos de comida se vieron influenciados por un pH muy ácido que inhibió por completo el proceso de fermentación anaeróbica, y en algunos otros la temperatura disminuyó drásticamente ocasionando que la producción de biogás disminuyera.

# ÍNDICE.

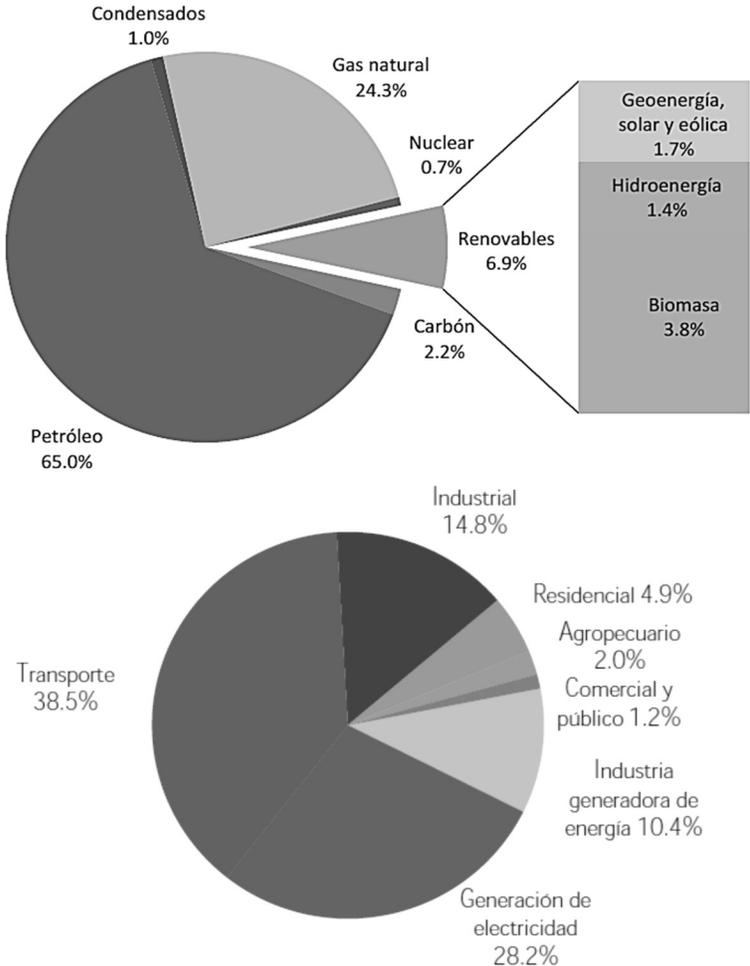
Resumen.....	08
Introducción.....	13
Objetivos.....	21
Metodología de Investigación.....	21
Capítulo 1. Conceptos generales.....	22
1.1. Antecedentes históricos y estudios realizados .....	23
1.2. Presión, Volumen y Temperatura.....	31
1.2.1. Presión.....	31
1.2.2. Volumen.....	32
1.2.3. Temperatura.....	32
1.3. Ley de los gases ideales.....	33
1.4. pH.....	35
1.5. Metano.....	37
1.6. Biogás.....	39
1.7. Biomasa.....	41
1.8. Fermentación anaeróbica.....	45
Capítulo 2. Biodigestor.....	50
2.1. Definición de biodigestor.....	51
2.2. Clasificación.....	51
2.2.1. Por la periodicidad de la carga.....	51
2.2.1.1. Biodigestores de carga Batch o discontinuo.....	52
2.2.1.2. Biodigestores de régimen semicontinuo.....	53
2.2.1.3. Biodigestores de régimen continuo.....	53
2.2.2. Según su forma.....	56
2.2.3. Según su posición.....	56
2.2.3.1. Superficiales.....	57
2.2.3.2. Semienterrados.....	57
2.2.3.3. Subterráneos.....	58
2.2.4. Según el tipo de mezcla.....	58
2.2.4.1. Biodigestores completamente mezclados.....	58
2.2.4.2. Biodigestores de mezclado parcial.....	59

2.2.5. Según la dilución de la carga.....	59
2.2.5.1. Biodigestores de digestión seca.....	59
2.2.5.2. Biodigestores de digestión húmeda.....	60
2.2.6. Biodigestores de dos etapas.....	60
2.2.7. Biodigestores de contacto anaeróbico.....	61
2.3. Factores que influyen en la producción de biogás.....	61
2.3.1. Masa seca (Ms).....	61
2.3.2. Masa volátil (Mv).....	62
2.3.3. Carga orgánica volumétrica (COV).....	63
2.3.4. Ausencia de Oxígeno.....	64
2.3.5. Concentración de la carga.....	64
2.3.6. Temperatura.....	65
2.3.7. pH.....	65
2.3.8. Tiempo de retención hidráulica (TRH).....	66
2.3.9. Relación de Carbono-Nitrógeno (C/N) de la carga.....	67
2.3.10. Agitación y mezclado.....	68
2.4. Biodigestores en el mundo.....	69
Capítulo 3. Equipos de medición.....	75
3.1. Manómetros.....	76
3.1.1. Barómetro.....	77
3.1.2. Tubos piezométricos.....	78
3.1.3. Manómetro en U.....	80
3.1.4. Manómetro diferencial.....	80
3.1.5. Manómetro tipo pozo.....	81
3.1.6. Manómetro tipo pozo inclinado.....	82
3.1.7. Manómetro de Bourdon.....	82
3.2. Termómetros.....	83
3.2.1. Termómetro de Mercurio.....	84
3.2.2. Termómetro bimetalico.....	85
3.2.3. Termómetro de dilatación de gas.....	86
3.3. Termopares.....	86
3.4. Analizador de Gases.....	88
3.4.1. Sensores Catalíticos.....	88

3.4.2. Sensores Electroquímicos.....	90
3.4.3. Sensores Infrarrojos.....	91
Capítulo 4. Materiales para la construcción de los biodigestores.....	93
4.1. Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV).....	94
4.1.1. Fibra de Vidrio.....	94
4.1.2. Resinas.....	95
4.1.2.1. Resinas de poliéster.....	97
4.1.2.1.1. Resinas Ortoftálicas.....	97
4.1.2.1.2. Resinas Isoftálicas.....	98
4.1.2.2. Resinas Viniléster.....	98
4.1.2.3. Gel-coat.....	98
4.1.3. Aceleradores y catalizadores.....	99
4.2. Prueba de tensión al PRFV.....	100
Capítulo 5. Diseño.....	106
5.1. Cuerpo del biodigestor.....	108
5.2. Tapa del biodigestor.....	112
5.3. Salida de gas.....	115
5.4. Vista de conjunto.....	115
5.5. Volumen teórico del biodigestor.....	117
5.5.1. Volumen de la tapa.....	117
5.5.2. Volumen del cuerpo del biodigestor.....	119
5.5.3. Volumen total.....	120
5.6. Presión máxima que soporta el recipiente.....	121
Capítulo 6. Construcción y puesta en marcha.....	126
Capítulo 7. Resultados y Discusión.....	135
7.1. Dimensionamiento de dos biodigestores para la FES Cuautitlán.....	176
Conclusiones.....	198
Anexos.....	201
A1. Pruebas de Tensión al PRFV.....	202
A2. Conversión de Unidades.....	205
Referencias y Bibliografía.....	206

# **INTRODUCCIÓN**

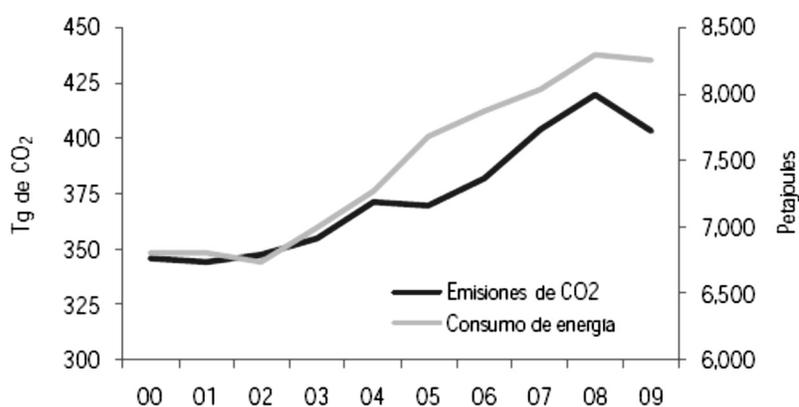
Según el Balance Nacional de Energía 2010, la generación de energía eléctrica se compuso de (como se muestra en la figura I.1) condensados 1%, Petróleo 65%, Gas natural 24.3%, Nuclear 0.7%, energía renovable, 6.9% y carbón 2.2%, es decir, que casi el 92% corresponde a la quema de combustibles, lo que equivale al 28.1% de las emisiones de CO<sub>2</sub> que se produjeron en el país, es decir, que de acuerdo con información de la Asociación Internacional de Energía (AIE), el sector energético en México generó 3.8 ton/hab de CO<sub>2</sub> de los cuales el transporte generó 38.5% del total. El sector energético contribuye con aproximadamente 80% de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) en el mundo.



**Figura I.1- Generación de energía eléctrica y sus emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes.**  
**Fuente: Balance Nacional de Energía 2010.**

En su mayoría, estas emisiones se derivan de la combustión al liberar CO<sub>2</sub> como resultado de la oxidación de carbono en los combustibles, aunque también considera las emisiones fugitivas como la liberación de gases como metano (CH<sub>4</sub>) que resulta de los procesos de producción, transformación, distribución, almacenamiento y uso de energéticos.

Si únicamente se consideran las emisiones por combustión, el sector energético mundial aporta aproximadamente el 60% de éstas. En la figura I.2 se puede observar la relación que existe entre el comportamiento del consumo nacional de energía en México y las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector. La alta dependencia en los combustibles fósiles ha sido un factor determinante en el comportamiento ascendente de las emisiones del sector en los últimos años.



**Figura I.2.- Comportamiento del consumo nacional de energía en México y las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector energético.**

**Fuente: Balance Nacional de Energía 2010.**

La energía en una vivienda es utilizada principalmente para calentar agua, preparar o conservar alimentos, iluminación, diversión, etc. El mayor uso de energía se da en la cocción de alimentos, seguido por el calentamiento de agua, los electrodomésticos y por último los rubros de iluminación y climatización, cabe aclarar que el norte de México con clima cálido-seco y las costas con clima cálido-húmedo, demandan mayor energía para la climatización, rebasando el dato que a nivel nacional ocupa la cocción de alimentos. El 23 % del consumo total de energía en una vivienda es por electricidad.

Por tal motivo es necesario buscar alternativas de generación de energía eléctrica o térmica sin generar emisiones de gases de efecto invernadero. Una alternativa es la producción de biogás a través de la descomposición de la materia orgánica. El biogás es un término que se da a diferentes gases combinados que son el resultado de la descomposición anaeróbica, bajo ciertas condiciones, de desechos orgánicos tales como estiércol, desechos vegetales e incluso aguas residuales. Este proceso, además de generar el biogás, le da utilidad a lo que en un principio sólo se consideraba desecho, ya que los residuos obtenidos del proceso de descomposición pueden ser reutilizados como abono. El principal componente del biogás es el metano, el cual es un combustible altamente utilizado para la generación de energía eléctrica, entre otras aplicaciones.

El biogás se puede obtener mediante la descomposición de tres fuentes: desechos de animales; desechos de cocina y poda de pasto; y desechos de alcantarilla. Los desechos que generan mayor cantidad de metano son los de alcantarilla seguida de los desechos de animales y por último el de poda de pasto y residuos de alimentos. La selección del tipo de desecho depende de la disponibilidad del mismo, por ejemplo de los residuos domésticos, de la granja o cultivo. La producción de desechos domésticos es una variable que depende básicamente del tamaño de la población y de sus características socioeconómicas y varía de una población a otra, de acuerdo principalmente a su grado de urbanización, su densidad poblacional y su nivel de consumo o nivel socioeconómico. Según el análisis sectorial de desechos sólidos en la Zona Metropolitana del Valle de México, aproximadamente el 53% de los desechos generados pueden emplearse para la producción de biogás y la SEDESOL reporta 25,000 ton/día de desechos que se depositan en tiraderos a cielo abierto, barrancas o bien, en cualquier otro sitio sin control (incluye sitios clandestinos).

En el caso particular de la FES Cuautitlán, se pueden aprovechar los desechos orgánicos producidos tanto por los animales existentes en los corrales pertenecientes a la carrera de MVZ, como los desechos orgánicos producto del cultivo de productos agrícolas (maíz, alfalfa, sorgo, cebolla, vides, nopal, etc.) de los campos de la Carrera de Ingeniero Agrícola, para obtener biogás (metano) que puede ser suministrado a los laboratorios o que permita calentar agua para diferentes usos por ejemplo regaderas del gimnasio y para limpieza en los comedores. En general se pueden aprovechar los desechos presentados en la tabla I.1.

**Tabla I.1.- Clasificación de los desechos orgánicos encontrados en la FESC.**

<b>ORIGEN DEL DESECHO</b>	<b>TIPO DE DESECHO</b>
Origen animal	Estiércol de ganado vacuno (vaca y toro)
	Estiércol de ganado ovino y caprino (borrego, cabras y chivos)
	Estiércol de ganado equino (caballo, mula, burro y poni)
Agrícolas	Poda de pasto y árboles
	Residuos de cosechas
Cocina	Residuos de comedores
	Residuos de la fabricación de alimentos

Para la obtención de biogás se utilizan equipos llamados biodigestores, los cuales en su forma simple son un contenedor sellado herméticamente, en donde se deposita cierta cantidad de materia orgánica, combinada con agua para su descomposición por medio de diferentes tipos de bacterias. La clasificación de los biodigestores es extensa, pero para fines prácticos en este trabajo podemos distinguir tres tipos; continuos, semicontinuos y discontinuos. Cada uno de ellos con sus respectivas ventajas y desventajas las cuales se analizarán durante la realización de esta tesis. Los factores más relevantes que influyen directamente en el proceso de fermentación dentro de un biodigestor, son la temperatura, el pH, la concentración carbono nitrógeno, la concentración y dilución de la carga.

Aunque la generación de biogás representa una solución a futuro a los estragos ocasionados por la sobre explotación de los combustibles fósiles, los inicios de la historia del biogás se remontan hace 5000 años atrás, ya que la utilización de desechos orgánicos para la obtención de energía se ha registrado desde antes de nuestra era. Como muestra de ello, hace 3000 años los sumerios ya practicaban la degradación anaerobia de los residuos.

A pesar de que se tiene conocimiento de estos dispositivos desde hace mucho tiempo su aplicación hoy en día es escasa, pocos son los países que han optado por este tipo de tecnología. Actualmente su uso se centra principalmente en zonas rurales donde se tiene una gran cantidad de desechos orgánicos a la mano para poder poner en funcionamiento un biodigestor, aunque en zonas urbanas podrían emplearse para recolectar el biogás generado del drenaje de estas zonas.

Con base en lo anterior se propone como tema de tesis el diseñar y construir un prototipo experimental que permita estudiar la generación de biogás. Además de contar con el prototipo experimental, se espera contar con resultados experimentales que permitan observar el proceso de generación de biogás, en función de la proporción de materia orgánica y agua y del tipo de materia orgánica. En México es escasa la información sobre Biodigestores y es por eso que con el presente trabajo se desea contribuir al conocimiento, en cuanto a la descomposición de la materia orgánica, así como de la generación de biogás.

Con la finalidad de poder asegurar las mismas condiciones de temperatura, radiación, etc., para poder comparar los resultados obtenidos de generación de biogás con cada materia orgánica de la FESC, se realizaron pruebas experimentales simultáneas por lo que se construyeron doce prototipos, con el diseño propuesto en el trabajo.

El diseño se basó en el del tipo discontinuo ya que el volumen a emplear no es alto y resultaba impráctico estar constantemente realizando las operaciones de llenado de nueva materia orgánica y extracción del abono, además de que el laboratorio donde se realizó el proyecto está relativamente lejos de todos estos desechos.

Para cumplir con el objetivo planteado en esta tesis, este documento se organizó de la siguiente forma:

En el capítulo uno se aborda una breve historia sobre el biogás y los biodigestores así como los conceptos básicos que fueron de importancia para el proyecto, estos son los conceptos de presión, volumen, temperatura, la ley de los gases ideales y pH. Posteriormente se incluyen los términos de biogás, biomasa y fermentación anaeróbica.

En el capítulo dos, se trata exclusivamente el tema de biodigestores, en donde se expone su definición, su clasificación de acuerdo a diferentes criterios; tales como su periodicidad de recarga, su forma entre otros, las variables que interfieren en su funcionamiento y por último sobre algunos de los biodigestores más representativos en el mundo y en Latinoamérica. También se incluye un apartado sobre algunos proyectos de investigación que se han realizado para la obtención de metano mediante la degradación de materia fecal.

Los diferentes instrumentos de medición que se emplean para la medición de las variables de presión, temperatura y análisis de los gases, se presentan en el capítulo tres.

Las características del material con el que se elaboraron los biodigestores, es decir, el plástico reforzado con fibra de vidrio, se explican en el capítulo cuatro, en donde además se incluye la realización de una prueba de tensión realizada a este material.

El desarrollo del diseño utilizado para la fabricación de los recipientes así como los planos se presentan en el capítulo cinco, también, se enuncian sus características y se calcula la presión máxima que pueden soportar estos recipientes.

La construcción de los prototipos así como su instrumentación y puesta en marcha, se presentan en el capítulo seis.

En el capítulo siete se presentan las gráficas resultantes de las pruebas experimentales realizadas a los biodigestores y al final del capítulo se describe la propuesta de dimensionamiento de dos biodigestores para la FES Cuautitlán empleado excremento de vaca y conejo respectivamente.

## **Objetivo:**

- Diseñar y construir un prototipo experimental que permita estudiar la descomposición anaeróbica de la materia orgánica para la obtención de biogás.
- Instrumentar y poner en marcha el prototipo experimental.
- Observar el comportamiento de la generación de metano al emplear diferentes muestras de materia orgánica disponible en la FES Cuautitlán.

## **Metodología de investigación.**

La metodología a seguir es la siguiente:

- Revisión de antecedentes del tema.
- Planteamiento de objetivos.
- Recopilación de la bibliografía pertinente para profundizar en el tema.
- Diseño del Biodigestor y selección de materiales.
- Construcción de Biodigestores.
- Puesta en Marcha.
- Pruebas experimentales en los Biodigestores.
- Análisis de resultados.
- Conclusiones

# **CAPÍTULO 1**

## **CONCEPTOS GENERALES**

## **1.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y ESTUDIOS REALIZADOS.**

En base a lo establecido por Dieter Deublein y Angelika Steinhauser en su obra “Biogas from Waste and Renewable Resources” los inicios de la historia del biogás se remontan a más de 5000 años atrás, dado que la utilización de desechos orgánicos para la obtención de energía se ha registrado de antes del nacimiento de Cristo.

Como muestra de ello, hace 3000 años antes de Cristo los sumerios ya practicaban la limpieza anaerobia de los residuos. En el relato del viaje de Marco Polo se describen una especie de tanques cubiertos que almacenaban las aguas residuales en la antigua China, aunque no se especifica si la finalidad de estos era la producción de biogás o alguna otra función. Por otro lado, el primer uso de biogás fue para el calentamiento del agua de los baños públicos en Asiria, en el siglo X a.C. La ciencia del proceso de producción de biogás es tan vieja como puede ser la investigación científica e incluye los nombres de la mayoría de los investigadores más famosos del mundo. Haciendo una recapitulación de los numerosos estudios sobre este proceso, vemos que la primera anotación científica sobre el biogás se atribuye a Jan Baptista Van Helmont, en la primera mitad del siglo XVII (1630), quién determinó que de la descomposición de la materia orgánica se obtenían unos gases que eran inflamables.

La fermentación anaeróbica se ha venido utilizando desde hace varios siglos en Europa y Asia. Los primeros reportes de su aplicación datan del año 1776 y se le adjudican a Volta. El 14 de noviembre de 1776, el científico italiano Alejandro Volta, publica en una carta “Aria infiammabile native delle Paludi” en la que indica el descubrimiento de la formación de un gas combustible sobre pantanos, lagos y aguas estancadas y relacionó la formación de biogás con la cantidad de materia orgánica depositada en su fondo. La importancia de estos resultados se reconoció totalmente por la comunidad científica de la época, lo que queda reflejado por el hecho que su carta se tradujo al alemán sólo dos años después de su aparición.

En el Nuevo Continente, en 1764, Benjamín Franklin describió que el biogás pudo ser el causante que se prendiera fuego en una gran superficie de un brumoso lago poco profundo en New Jersey. De esto informó a Joseph Priestly en Inglaterra, quién publicó en 1790 sus propias experiencias con el denominado “aire inflamable”.

La primera planta de digestión anaerobia fue construida en una colonia de leprosos, en Bombay, India en 1859. Desde entonces se han construido miles de digestores en la India, China, Taiwán, Corea, Tailandia, Kenia y Sudáfrica. La aplicación de biodigestores se desarrolló en países como Inglaterra, que en 1895 los utilizaban para usar biogás como combustible para las lámparas de alumbrado público en Londres.

La primera aplicación de la digestión anaerobia para el tratamiento de agua de alcantarillado no es hasta 1860 con el desarrollo de una cámara de aire hermética simple por Mouras en Francia.

En 1868 el biólogo inglés Antonio Béchamp definió las reacciones como constituyentes de un proceso microbiológico. La ecuación del gas metano fue descubierta por Amedeo Avogadro en 1821. También se reporta que los ingleses John Dalton, William Henry y Humphry Davy fueron los desarrolladores de la composición química del gas metano entre los años de 1804 a 1810.

En 1884 el químico francés Louis Pasteur, realizó investigaciones del biogás producido por residuos animales. Uno de sus alumnos, fermentó 1 m<sup>3</sup> de estiércol de Ganado a 35 °C, obteniendo como resultado de la reacción química unos 100 litros de biogás. Este experimento dio tan buenos resultados que Pasteur expuso que se podría utilizar como combustible para calefacciones y para alumbrado público. Tanto fue el eco de estos resultados que se pensó en aprovechar el estiércol de los miles de caballos que en esa época servían como transporte público jalando las carretas en la ciudad de Paris.

En 1901, Schengon, describió detalladamente las características morfológicas de las metanobacterias y sugirió un concepto relativamente claro de su capacidad de conversión en metano.

En el año 1906 se realizó la construcción de la primera planta de tratamiento en Alemania. En el año 1913 se construyó el primer digestor con calefacción y en el año 1920 se construyó una planta depuradora de aguas residuales anaeróbica con producción de biogás que se inyectó a la red pública de gas natural.

Uno de los países que mayor interés que ha mostrado por las fuentes de energía no convencionales y en especial por la producción de biogás, ha sido Alemania. En 1920, el Ing. Karl Imhoff instaló el primer biodigestor en Alemania. Este consistía en un estanque hermético, el cual era alimentado con material fermentable para la obtención de biogás.

Hacia 1921, en Birmingham (Inglaterra) se instaló el primer motor de 25 Hp para utilizar el gas de lodos y tuvo tanto éxito que en 1927 se instaló un motor de 150 HP, otro en 1928 y dos motores más de 400 HP en 1930.

En 1923 en Alemania se vendió el primer gas metano a la red pública de gas. También en ese mismo año, Yvonne Khouvine aisló de las heces humanas un bacilo anaerobio capaz de descomponer activamente la celulosa.

Con motivo de la II Guerra Mundial se desarrollaron en Alemania un gran número de instalaciones de digestión anaerobia con el fin de potenciar nuevas fuentes de energía, y aunque la tecnología se extendió al resto de Europa Occidental, cuando cesaron las condiciones de escasez de combustibles sólo quedaron funcionando algunos pocos digestores en Alemania y Francia.

Alrededor de los años cuarenta del siglo pasado, en los Estados Unidos, se emplea el término de “digestión anaeróbica” como una parte del tratamiento de las aguas residuales, generando metano que es utilizado para generar electricidad para las propias plantas de depuración.

Después de la II Guerra Mundial se construyeron cerca de 40 digestores en Europa, pero su desarrollo se frenó por los bajos precios de los combustibles fósiles. Después de esta gran guerra la generación de biogás se extendió y se desarrolló en diversos países, tales como: Sudáfrica, Rodesia, Kenia, Uganda, Rusia, Australia, Italia, Corea, Taiwán, Japón, Israel, Estados Unidos, India y Filipinas.

En el norte de África, en la zona francesa, entre 1940-1951 se ha reportado los enormes esfuerzos realizados para la construcción de los llamados digestores de metano. El diseño y prototipos fueron desarrollados por G. Ducellier y por M. Isman, desde 1937.

A finales del siglo XIX fue demostrada la presencia de microorganismos involucrados en el proceso de fermentación metánica. En estos finales del siglo XIX se construyen en el sur de China las primeras plantas de biogás, tal y como se conocen actualmente.

En 1957, un inventor inglés llamado Harold Bates, modifica su coche para hacerlo funcionar con biogás producido de estiércol de gallinas, consiguiendo que siguiera funcionando durante 17 años.

Durante los años de la década de los 60 se impulsó notablemente la tecnología de producción de biogás a partir del estiércol de bovino en la India, con el doble objetivo del aprovechamiento energético y el mantenimiento de las propiedades fertilizantes del digerido.

En China, en la década de los años 70 se impulsa la construcción de digestores, mediante programas de ámbito nacional. En 1977 había más de cinco millones de digestores anaerobios en China, debido al bajo costo de los materiales empleados, lo que reducía los costos de inversión.

En los países industrializados, el desarrollo de la metanización ha estado más influenciado por criterios medioambientales que los puramente energéticos, siendo en método clásico de estabilización de las aguas residuales urbanas. De hecho, hasta que se produjo la “Crisis del Petróleo”, el proceso anaeróbico, había sido considerado por los países industrializados como un tratamiento para reducir las altas cargas orgánicas de algunos residuos, pero sin aprovechar los lodos como fertilizantes o el metano como combustible.

La segunda oleada de construcciones de digestores tuvo lugar en los años 70 del pasado siglo, a raíz de la “Crisis del Petróleo”. Pero su desarrollo se frenó por la escasa producción de metano y el elevado coste de las instalaciones a finales de los 80, agravando el problema la caída de los precios del petróleo. En 1984, se construyó la primera planta centralizada de biogás en Dinamarca. Y se comenzó un ambicioso proyecto de demostración desarrollado conjuntamente por el Ministerio de Agricultura y el de Medioambiente Danés, en un esfuerzo por demostrar el potencial de las grandes plantas como productoras de energía eléctrica.

Con la nueva legislación eléctrica de los años 90, en Alemania, se produjo una nueva oleada de construcción de biodigestores, que todavía se mantiene gracias al pago por kWh producido. De hecho, al final de los años noventa del pasado siglo, se construyeron y se implementaron numerosas plantas para el tratamiento mecánico-biológico de las basuras. La tecnología estaba basada en procesos anaerobios con algún compostaje aerobio. El proceso anaerobio demostró ser ventajoso ya que permitió proporcionar bastante energía para la propia planta.

En los países latinoamericanos también se ha venido incursionando en el desarrollo de proyectos industriales para el aprovechamiento de desechos orgánicos para la producción de biogás. En Nicaragua, la Licorera de Nicaragua (CLNSA), construyó en 2005 una planta de biogás para el aprovechamiento de las vinazas para la producción de biogás. Se trata de una planta de biogás para la producción de 2.5 MW de energía.

En Europa, la mayoría de los países aprovechan los residuos orgánicos para la producción de biogás, energía eléctrica y biofertilizantes. Se han construido más de 10000 biodigestores en los últimos 20 años. En 2006, Europa produjo el biogás equivalente a 5.3 millones de toneladas equivalentes de petróleo.

En el año 2007 se estableció en Jameln (distrito de Lüchow-Dannenberg) la primera gasolinera de biogás. De este modo, los propietarios de vehículos que utilizan gas natural como combustible, pueden adquirir gas de combustible obtenidos a partir de recursos regenerativos.

Actualmente en Alemania es difícil encontrar instalaciones agropecuarias que no aprovechen los desechos orgánicos para la producción de biogás y la generación de energía eléctrica. En este país se ha establecido un marco legal en donde el estado incentiva la construcción de plantas de biogás a través de bonos y deducciones de impuestos. Hasta el año 2012, en Alemania, se contaba con más de 7500 plantas de biogás.

Hoy en día, factores como el precio de los combustibles derivados del petróleo y la contaminación que estos generan como resultado de su combustión (emisiones de CO<sub>2</sub>), aunado a que no se le augura una larga existencia, debido a que son recursos no renovables, ha originado un interés latente en la incursión del diseño y construcción de biodigestores, que utilizando desechos orgánicos, puedan generar energía aprovechable.

Se han realizado estudios para observar el comportamiento de la generación de biogás bajo distintas características como:

Amarely Santana y B. Pound [1] observaron que la variación en la alimentación de dos novillos (hierba/melaza o caña de azúcar picada) puede influenciar en la generación de metano. Encontraron que la dieta a base de melaza/hierba produce mayor cantidad de metano y sugieren que esto es debido a que se tiene una mayor relación carbono - nitrógeno que la dieta a base de caña de azúcar.

San Thy y et al [2] observaron la producción de biogás, mediante la descomposición de materia fecal de cerdo, con tiempos de retención de 10, 20 o 30 días en biodigestores continuos de 510 litros. En el primer experimento, la cantidad de materia fecal fue de 5.1 kg/día, mezclado con 46, 20 o 12 litros de agua con tiempos de retención de 10, 20 o 30 días respectivamente. En un segundo experimento las proporciones de materia fecal y agua se mantuvieron constantes para dar un contenido de sólidos totales de 60 g/litro. Obtuvieron una producción de 1.04, 1.20 y 1.12 m<sup>3</sup> de biogás por un m<sup>3</sup> de efluente y que el tiempo de retención óptimo está entre 10 y 20 días.

Chae y et al [3] observaron el comportamiento de la generación de biogás al variar la temperatura del estiércol de cerdo en el proceso de degradación. Tomaron valores de 25 °C, 30 °C y 35 °C con cuatro cargas de alimentación al 5%, 10%, 20% y 40%. Observaron una reducción en la concentración de metano del 3% entre el de la temperatura de 35 °C y la de 30 °C y una diferencia del 17.4% entre la de 35 °C y el de 25 °C. Obtuvieron valores de 327, 389 y 403 ml de CH<sub>4</sub>/g de sustrato respectivamente.

Stephanie y et al [4] al estudiar siete biodigestores de bajo costo en Costa Rica empleando como sustrato al agua residual de los animales, encontraron que se podía obtener biogás con una concentración del 66% de metano mejorando la calidad de las aguas residuales para ganado.

Atem y et al [5] llenaron 20 biodigestores discontinuos de PET con capacidad de 4 litros con residuos de tomate de la industria local y fluido ruminal como inóculo. Después de mantener la temperatura constante durante 118 días, inició la medición del biogás generado durante otros 34 días obteniendo 0.10 m<sup>3</sup> de biogás por kg con un 50% de metano.

Ivet Ferrer y et al [6] estudiaron la producción de biogás en digestores domésticos ubicados a gran altura, operando bajo condiciones psicrófilas. Utilizaron un volumen útil de estiércol de vaca entre 2.4 m<sup>3</sup> y 7.5 m<sup>3</sup> en pruebas de 60 y 90 días. Obtuvieron temperaturas entre 20°C y 25°C y una producción de 0.35 m<sup>3</sup> por kg, con una concentración del 65% de CH<sub>4</sub>.

Sung-Mok y et al [7] encontraron que a partir de la fermentación de Laminaria japónica, se incrementaba la generación de biogás al emplear un cultivo mixto de Clostridium butyricum y Erwinia tasmaniensis, llegando a tener niveles de hidrógeno y metano de 327,47% y 354,99% superiores, respectivamente.

M.S. Ak y et al [8] realizaron un estudio en el cual duplicaron la producción de biogás que se genera por la degradación del lodo activado producido durante el tratamiento biológico de residuos líquidos y sólidos, empleando al ozono (1.33 mg O<sub>3</sub>/g).

González y et al [9] realizaron un estudio para determinar la capacidad de una planta de generación de energía eléctrica empleando metano generado por la degradación de residuos de cerdo y una planta fotovoltaica. Realizaron experimentos con tres biodigestores continuos alimentándolos con 150, 200 y 250 ml de sustrato al día, durante 40, 30 y 24 días respectivamente. Encontraron una producción máxima de 22.53 m<sup>3</sup> de biogás por un m<sup>3</sup> de sustrato, con un contenido de metano del 75%.

## 1.2. PRESIÓN, VOLUMEN Y TEMPERATURA.

Las propiedades involucradas en este trabajo son la presión, volumen y temperatura, las cuales se definen a continuación.

### 1.2.1. Presión.

La presión se define como la cantidad de fuerza que se ejerce sobre una unidad de área de una superficie o una sustancia. Matemáticamente se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$p = \frac{F}{A} \quad \text{(Ecuación 1.1)}$$

Donde:

$F$  → Es la fuerza expresada en Newton [N], en el sistema internacional, o libras fuerza [lbf] en el sistema inglés.

$A$  → Es el área expresada en metros cuadrados [m<sup>2</sup>] en el sistema internacional, o pies cuadrados [ft<sup>2</sup>] en el sistema inglés.

$p$  → Es la presión expresada en Pascales  $\left[\frac{N}{m^2}\right]$  en el sistema internacional, o psf  $\left[\frac{lbf}{ft^2}\right]$  o psi  $\left[\frac{lbf}{in^2}\right]$  en el sistema inglés.

La presión también puede ser expresada en términos de altura equivalente “ $h$ ” de una columna de fluido y su peso específico “ $\gamma$ ”:

$$p = \gamma h \quad \text{(Ecuación 1.2)}$$

### 1.2.2. Volumen.

El volumen es una propiedad extensiva y geométrica, para el caso del prototipo es una longitud multiplicada por un ancho y multiplicado por una altura que se describe simplemente como una “longitud al cubo”.

Representamos al volumen con la letra “V” y lo expresamos en unidades de metros cúbicos ( $m^3$ ). Otras unidades que se pueden usar para expresar el volumen son los litros (L) y los centímetros cúbicos ( $cm^3$  o cc). En el sistema inglés, las unidades comunes de volumen son pies cúbicos ( $pie^3$ ), galones (gal) y pulgadas cúbicas ( $pulg^3$ ).

### 1.2.3. Temperatura.

La temperatura es la propiedad que describe que tan caliente es un sistema. La temperatura no mide en forma directa, ni el calor, ni la energía térmica de una sustancia.

Con frecuencia la temperatura se registra en grados Celsius o centígrados ( $^{\circ}C$ ), que es la unidad del Sistema Internacional, o Fahrenheit ( $^{\circ}F$ ) la unidad del Sistema Ingles. Estas dos escalas se definen por los puntos de ebullición y congelación del agua pura a una presión de 101 kPa. Estas referencias son las siguientes:

- Ebullición del agua  $\rightarrow 100^{\circ}C$  o  $212^{\circ}F$
- Congelación del agua  $\rightarrow 0^{\circ}C$  o  $32^{\circ}F$

La escala absoluta que se relaciona con la escala Celsius es la escala Kelvin y se representa con la letra K, la relación entre estas escalas es:

$$K = ^{\circ}C + 273.15 \quad \text{(Ecuación 1.3)}$$

La escala absoluta relacionada con la escala Fahrenheit es la escala Rankine y se representa como R, la relación entre estas escalas es:

$$R = {}^{\circ}F + 459.67 \quad \text{(Ecuación 1.4)}$$

### 1.3. LEY DE LOS GASES IDEALES.

Un gas ideal es una sustancia imaginaria que obedece a la relación:

$$PV = nR_u T \quad \text{(Ecuación 1.5)}$$

En experimentos, se ha podido constatar que la relación de gas ideal se asemeja al comportamiento  $P$ - $V$ - $T$  de los gases reales a baja densidad. Bajo condiciones de baja presión y temperatura, la densidad de un gas disminuye y su comportamiento tiende a ser semejante al de un gas ideal. Cualquier ecuación que relacione presión, temperatura y volumen específico de una sustancia se denomina ecuación de estado. Hay diferentes ecuaciones de estado, la más sencilla aplicada a sustancias en estado gaseoso es la ecuación de estado de gas ideal, que predice el comportamiento  $P$ - $\bar{v}$ - $T$  de un gas con bastante exactitud.

$$P\bar{v} = RT \quad \text{(Ecuación 1.6)}$$

Las ecuaciones que relacionan las variables presión ( $P$ ), volumen ( $V$ ) y temperatura ( $T$ ) son de gran importancia en termodinámica. El comportamiento  $P$ - $\bar{v}$ - $T$  de gran número de gases en condiciones de presión baja y temperaturas relativamente moderadas, se puede predecir bastante bien mediante la ecuación de estado de gas ideal como la ecuación 1.5, que también se puede expresar de forma molar como se observa en la ecuación 1.7.

$$P\bar{v} = R_u T \quad \text{(Ecuación 1.7)}$$

Donde:

$P \rightarrow$  Es la presión absoluta del gas.  $\left[ Pa, \frac{lb_f}{pulg^2}, mmHg, \frac{kg_f}{cm^2} \text{ etc.} \right]$

$V \rightarrow$  Es el volumen del gas.  $[m^3, pulg^3, \text{etc.}]$

$\bar{v} \rightarrow$  Es el volumen específico en base molar.  $\left[ \frac{m^3}{kg_m}, \frac{pulg^3}{lb_m}, \text{etc.} \right]$

$T \rightarrow$  Es la temperatura absoluta del gas.  $[K, R]$

$n \rightarrow$  Es el número de moles del gas.  $[mol]$

$R_u \rightarrow$  Es la constante universal de los gases.  $\left[ \frac{J}{K \cdot mol}, \frac{mmHg \cdot L}{K \cdot mol}, \text{etc.} \right]$

La constante universal de los gases  $R_u$  es aplicable para cualquier gas que cumpla la condición de comportamiento de un gas ideal, este valor es expresado en diferentes unidades, ejemplos de esos valores se pueden observar en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1.- Valores de la constante universal de los gases mostrada en diferentes unidades.**

VALOR DE LA CONSTANTE $R_U$
$R_u = 8.314472 \frac{Pa \cdot m^3}{k \cdot mol}$
$R_u = 62.36367 \frac{L \cdot mmHg}{k \cdot mol}$
$R_u = 1.987207 \frac{cal}{k \cdot mol}$
$R_u = 1.545 \frac{lb_f \cdot pie}{R \cdot lb_{mol}}$

La ecuación de estado de gas ideal se utiliza con frecuencia con unidades de masa como kilogramo o libra, en lugar de kmol o libra-mol. En estos casos, en la ecuación del gas ideal se emplea una constante específica del gas  $R$  en lugar del valor universal  $R_u$ . La masa de un mol de una sustancia recibe el nombre de masa molar  $M$ . De este modo se

establece que la constante universal específica del gas ideal está definida por la ecuación 1.8:

$$R = \frac{R_u}{M} \quad \text{(Ecuación 1.8)}$$

La masa molar ( $M$ ) se define como la masa de un mol en gramos, o bien, la masa de un kmol en kilogramos. En el sistema inglés es la masa de 1 lb<sub>mol</sub> en lb<sub>m</sub>. La masa de un sistema es igual al producto de su masa molar  $M$  y el número de moles  $n$ :

$$m = MN \quad \text{(Ecuación 1.9)}$$

La ecuación de estado para un gas ideal se puede definir en términos de unidad de masa como:

$$PV = mRpT \quad \text{(Ecuación 1.10)}$$

Donde:

$P$  → Es la presión absoluta del gas.  $\left[ Pa, \frac{lb_f}{pulg^2}, mmHg, \frac{kg_f}{cm^2} \text{ etc.} \right]$

$V$  → Es el volumen del gas.  $[m^3, pulg^3, \text{etc.}]$

$m$  → Es la masa del gas.  $[kg, lb, \text{etc.}]$

$Rp$  → Es la constante específica del gas.  $\left[ \frac{J}{K \cdot kg}, \frac{mmHg \cdot L}{K \cdot kg}, \text{ etc.} \right]$

$T$  → Es la temperatura absoluta del gas.  $[K, R]$

#### 1.4. pH.

El pH es una medida que define que tan ácida o alcalina es una disolución. Dicha medida indica la concentración de iones hidronio  $[H_3O^+]$  que se encuentran en determinadas sustancias.

El pH de una disolución se define como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrógeno en (mol/L):

$$pH = -\log[H^+] \quad \text{(Ecuación 1.11)}$$

La escala de pH mide que tan ácida o básica es una sustancia. Varía de 0 a 14. Un pH de siete es una sustancia neutra. Si el pH es menor a siete, la sustancia se considera ácida. Si el pH es mayor a siete es una sustancia básica. Cada valor entero de pH por debajo de siete es 10 veces más ácido que el valor siguiente más alto. Lo mismo sucede con los valores de pH por encima de siete, cada uno de los cuales es 10 veces más alcalino que el siguiente valor entero más bajo. En la tabla 1.2 se muestran los valores de pH para algunas sustancias.

**Tabla 1.2.- Valores de pH de algunas sustancias comunes.**

SUSTANCIA	pH
Ácido clorhídrico (4%)	0
Jugo gástrico	1.6 – 1.8
Jugo de limón	2.1
Vinagre (4%)	2.5
Bebidas gaseosas	2.0 – 4.0
Leche	6.3 – 6.6.
Orina	5.5 – 7.0
Saliva	6.2 – 7.4
Agua pura	7.0
Sangre	7.4
Clara de huevo fresca	7.6 – 8.0
Bilis	7.8 – 8.6
Leche de magnesia	10.5
Sosa para lavar	12
Hidróxido de sodio (4%)	13

Fuente: Hill, John y Kolb, Norton. Química para el nuevo milenio.

## 1.5. METANO.

El metano es un compuesto orgánico formado únicamente por átomos de carbono e hidrógeno, por lo que se le considera un hidrocarburo del tipo alcano. Cada uno de los átomos de hidrógeno está unido al carbono por medio de un enlace covalente. Se le considera una sustancia no polar y se presenta en estado gaseoso a temperaturas y presiones ordinarias. Es incoloro e inodoro y apenas soluble en agua en su fase líquida. De forma natural, se produce por medio de la descomposición anaeróbica de las plantas. Conforman hasta el 97% del gas natural.

El metano es considerado un gas de efecto invernadero relativamente potente que contribuye al calentamiento global del planeta, ya que tiene un potencial de calentamiento global de 23.3. Esto significa que en una media de tiempo de 100 años cada kg de este gas calienta la Tierra 23 veces más que la misma masa de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), sin embargo hay aproximadamente 220 veces más dióxido de carbono en la atmósfera de la Tierra que metano, por lo que el metano contribuye de manera menos importante al efecto invernadero. Tiene un punto de ebullición de  $-161.5\text{ }^\circ\text{C}$  a una atmósfera y un punto de fusión de  $-183\text{ }^\circ\text{C}$ , es sólo inflamable en un estrecho intervalo de concentración en el aire que va de entre 5% al 15%. Si bien su calor de combustión, de unos  $802\text{ kJ/mol}$ , es el menor de todos los hidrocarburos, si se divide por su masa molecular ( $16\text{ g/mol}$ ) se encuentra que el metano, el más simple de los hidrocarburos, produce más cantidad de calor por unidad de masa que otros hidrocarburos más complejos.

Los orígenes principales de metano son:

- Descomposición de los residuos orgánicos por bacterias.
- Fuentes naturales (pantanos).
- Extracción de combustibles fósiles.

- Los procesos en la digestión y defecación de animales.
- Las bacterias en plantaciones de arroz.
- Digestión anaeróbica de la biomasa.
- Materia viva vegetal: (Se ha descubierto que plantas y árboles emiten grandes cantidades de gas metano).

La mayor fuente de metano es su extracción de los depósitos geológicos conocidos como campos de gas natural. Se encuentra asociado a otros hidrocarburos combustibles y a veces acompañado por helio y nitrógeno. El gas, especialmente el situado en formaciones poco profundas (baja presión), se forma por la descomposición anaeróbica de materia orgánica y el resto se cree que proviene de la lenta desgasificación de los materiales primordiales situados en las partes más profundas del planeta, tal como lo demuestra la presencia de hasta un 7% de helio en ciertos yacimientos de gas natural. En términos generales, los depósitos de gas se generan en sedimentos enterrados a mayor profundidad y altas temperaturas que los que dan lugar al petróleo. También se puede extraer metano de los depósitos de carbón mediante la perforación de pozos en las capas de carbón, bombeando el agua de la veta para producir una despresurización lo que permite la desabsorción del metano y su subida por el pozo hasta la superficie. Además de los campos de gas natural, una forma alternativa para obtener metano es mediante el biogás generado por la fermentación de la materia orgánica que se encuentra en el estiércol, en los lodos de las aguas residuales, en la basura doméstica, o en cualquier otra materia prima biodegradable, bajo condiciones anaeróbicas.

En muchas ciudades, el gas natural, se transporta en tuberías hasta las casas para ser empleado como combustible para la calefacción y para cocinar, también es importante para la generación eléctrica ya que se emplea como combustible en las turbinas de gas o en generadores de vapor.

## 1.6. BIOGÁS.

El biogás, es un término que se aplica a la mezcla de gases que se obtienen a partir de la descomposición, en un ambiente anaerobio, de los residuos orgánicos, como el estiércol animal o los productos de desecho de los vegetales. En este proceso realizado por bacterias, se libera una mezcla de gases formada por metano (el principal componente del biogás), dióxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y ácido sulfhídrico, en la tabla 1.3 se presenta la composición promedio del biogás. Es un combustible económico y renovable, se puede utilizar en vehículos con motor de combustión interna, para usos industriales y domésticos. La producción de biogás, además de aprovechar materia considerada como desperdicio, origina como subproducto un fertilizante de excelente calidad.

**Tabla 1.3.- Concentración promedio de los diferentes gases que componen el biogás.**

COMPONENTES	CONTENIDO
Metano	60-70 [%]
Dióxido de carbono	30-40 [%]
Hidrógeno	5-10 [%]
Nitrógeno	1-2 [%]
Oxígeno	0.1 [%]
Ácido Sulfhídrico	0.1-2 [%]

**Fuente: Moncayo Romero, Gabriel. Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás.**

El biogás es un combustible natural, no fósil, de alto poder calorífico dependiente del contenido de gas metano. El aprovechamiento del biogás comprende básicamente su uso como combustible para la generación de la energía eléctrica en generadores, turbinas, calderas, para alimentación a la red de gas natural y como combustible para vehículos.

El poder calorífico del biogás es de 4700 a 5500 kcal/m<sup>3</sup> dependiendo el contenido de metano y puede generar una cantidad de calor que va de los 19 a 23 MJ/m<sup>3</sup>. Su temperatura de autoignición es similar a la del metano puro y varia de 650 a 750 °C. Un m<sup>3</sup> de biogás que se aprovecha en un generador de energía eléctrica es suficiente para obtener 2.2 kWh de electricidad, capaz de mantener encendido por 20 horas un foco de 100 W. Algunas equivalencias energéticas entre distintas fuentes de energía se muestran en la tabla 1.4.

**Tabla 1.4.- Equivalencia energética de 1 m<sup>3</sup> de biogás.**

CANTIDAD EQUIVALENTE	FUENTE DE ENERGÍA	CAPACIDAD ENERGÉTICA (KWH/KG)
1 [m <sup>3</sup> ]	Metano	22
0.6 [kg]	Diésel	12
0.7 [kg]	Carbón	8.5
0.6 [m <sup>3</sup> ]	Gas natural	5.3
0.24 [m <sup>3</sup> ]	Gas propano	25
1.43 [kg]	Madera	4.3

**Fuente: Moncayo Romero, Gabriel. Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás.**

En la tabla 1.5 se muestra una comparativa del biogás con otros gases, tales como, el gas natural, el propano, el metano y el hidrógeno. De acuerdo a la tabla 1.5, se puede concluir que el biogás tiene un poder calorífico menor al del gas natural y el propano.

**Tabla 1.5.- Comparativa del biogás contra algunos gases.**

GAS	UNIDAD	BIOGÁS	GAS NATURAL	PROPANO	METANO	HIDRÓGENO
Poder calorífico	kWh/m <sup>3</sup>	6	10	26	10	3
Peso específico	kg/m <sup>3</sup>	1.25	0.7	2.01	0.72	0.09
Temperatura de encendido	°C	700	650	470	600	585
Contenido de oxígeno para explosión	%	6-12	4.4-15	1.7-10.9	4.4-16.5	4-7

**Fuente: Moncayo Romero, Gabriel. Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás.**

La densidad del biogás es de  $1.25 \text{ kg/m}^3$  y es más ligero que el aire. Esta condición permite la ascensión del biogás cuando se encuentra libre en el ambiente mezclándose con el aire. El biogás no se quema o explota con facilidad, necesita una mezcla homogénea de aire y gas para que encienda. No se puede encender con un fósforo una fuga de biogás que sale por un hueco de una membrana de cubierta de un digestor. El fósforo se apaga inmediatamente al entrar en contacto con el biogás por falta de una mezcla adecuada de oxígeno.

La temperatura de encendido del biogás es relativamente alta. El contenido de gas metano y dióxido de carbono que se produce de la materia orgánica depende del tipo de sustrato que se aprovecha en el biodigestor.

## **1.7. BIOMASA.**

El término biomasa (sustrato) se refiere a toda la materia orgánica que proviene de desechos y que pueden generar energía, tales como, estiércol, hojarasca, restos de árboles y plantas muertas, residuos de agricultura, aserraderos, incluso, desechos urbanos como la basura orgánica o las aguas residuales. Se refiere por tanto, a cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico natural. El término biomasa comprende tanto a la materia de origen vegetal y a los de origen animal que se producen u obtienen en cualquier proceso agroindustrial, agropecuario o agrícola.

La biomasa puede clasificarse en natural, residual y producida. La natural es aquella que es producida sin que exista ninguna intervención del ser humano, por ejemplo en bosques, matorrales, montañas, áreas no cultivadas, etc. La utilización de estos recursos requiere de la gestión durante su adquisición y transporte hasta el sitio de consumo, lo que puede provocar que su uso no sea viable económicamente.

La que se obtiene como consecuencia de la actividad humana, como por ejemplo los procesos agrícolas, ganaderos y del hombre (como la basura, las aguas residuales, el aserrín, el excremento, etc.) hacen referencia a la Biomasa residual.

Uno de los problemas más críticos que enfrenta el mundo actual es el manejo inadecuado de los residuos producidos por las actividades agropecuarias y agroindustriales. Estos residuos se eliminan generalmente sin un tratamiento previo, por lo que se constituyen en agentes contaminantes de considerable alcance; afectando los ecosistemas, alterando el equilibrio ecológico y la calidad de vida.

En las instalaciones agropecuarias se utilizan sistemas de manejo de residuos para su recolección y almacenamiento. Estos residuos pueden ser líquidos, semisólidos o sólidos y deben ser acondicionados antes de que sean alimentados a los digestores. La preparación previa a que se someten estos residuos depende de su naturaleza.

En muchas ocasiones, la biomasa se elimina por ser una molestia para la instalación que la produce o porque entorpece las labores agrarias o ganaderas que la generan. Cuando esto ocurre, se está desperdiciando una fuente de energía importante.

De acuerdo a Moncayo Romero Gabriel en su obra “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, tradicionalmente, los residuos ganaderos se han venido utilizando como fertilizantes agrícolas, debido a su alto contenido en materia orgánica y nutrientes minerales. Sin embargo, con el aumento y tecnificación de explotaciones ganaderas de tipo intensivo, ha supuesto una producción de residuos orgánicos que ya no puede ser gestionada, siguiendo las prácticas tradicionales debido a las siguientes razones:

- Su producción en grandes explotaciones y en enormes cantidades dificulta su aplicación para usos agrícolas como fertilizantes. El riesgo de una aplicación inadecuada, con los efectos medioambientales y sanitarios es muy grande.

- La concepción industrial de la explotación ganadera, asociado a un aumento importante en la producción, ha traído consigo en los últimos años la aparición de un grave problema medioambiental por la contaminación de los campos, acequias y ríos. Por lo general cuando los suelos están saturados o no pueden recibir más desechos agropecuarios.

Por último la biomasa producida es aquella que es cultivada con el propósito de servir como materia prima para la producción de combustibles en vez de servir como alimentos para el consumo humano. Los cultivos energéticos para producción de biomasa para la obtención de combustibles ya son una realidad en algunos países como Brasil, Estados Unidos, Argentina, Alemania, entre otros, que se enfocan en la producción de caña de azúcar y maíz, a la obtención de etanol para la fabricación de carburantes y biogás para la producción de electricidad.

Además, podemos distinguir dos formas en la que la biomasa puede ser aprovechada: quemándola para producir calor o transformándola en combustible para facilitar su transporte y almacenamiento.

La biomasa está compuesta por hidratos de carbono, lípidos y proteínas, las proporciones de estos varía según su procedencia, por ejemplo, la biomasa de origen vegetal tiene una mayor proporción de hidratos de carbono, en cambio, la de origen animal contendrá en mayor proporción lípidos y proteínas. Para la explotación de la biomasa con fines energéticos se requiere de su transformación para poder utilizarse en sistemas convencionales. Estos procesos pueden ser físicos, químicos, biológicos y termoquímicos.

Físicos: Actúan físicamente sobre la biomasa y están asociados a las fases primarias de transformación dentro de lo que puede denominarse fase de acondicionamiento, como triturado, astillado, compactado e incluso secado.

Químicos: Relacionado con la digestión química, generalmente mediante hidrólisis, pirolisis y gasificación.

Biológicos: Por la acción directa de microorganismos o de sus enzimas, en general llamado fermentación. Son procesos relacionados con la producción de ácidos orgánicos, alcoholes, cetona y polímeros.

Termoquímicos. Se basan en la transformación química de la biomasa al someterla a altas temperaturas que van desde los 300 hasta los 1500 °C. Cuando se calienta la biomasa se produce un proceso de secado y evaporación de sus componentes volátiles, seguido de reacciones de crackeo, es decir, descomposición de sus moléculas, seguidas por reacciones en la que los productos resultantes de la primera fase, reaccionan entre sí y con los componentes de la atmosfera en la que ocurre la reacción, obteniéndose así los productos finales. Según el control de las condiciones del proceso se obtienen productos finales diferentes, lo que origina los tres procesos principales de la conversión termoquímica de la biomasa:

Combustión: Se produce en una atmosfera oxidante de aire u oxígeno. Cuando se completa se obtiene dióxido de carbono, agua y sales minerales (cenizas) y calor en forma de gases calientes.

Gasificación: Es una combustión incompleta de la biomasa a una temperatura de entre 600 a 1500 °C en una atmosfera pobre de oxígeno, en la que la cantidad disponible de un compuesto está por debajo de punto estequiométrico, es decir, el mínimo necesario para que se produzca la reacción de la combustión. En este caso se obtiene principalmente un gas combustible formado por monóxido y dióxido de carbono, nitrógeno y metano.

Pirolisis: Proceso en la descomposición térmica de la biomasa en ausencia casi total de oxígeno. En procesos lentos y temperatura de 300 a 500 °C el producto obtenido es carbón vegetal, mientras que en procesos rápidos (segundos) y temperaturas entre 800 a 1200 °C se obtienen mezclas de compuestos orgánicos de aspecto aceitoso y de bajo pH, denominados aceites de pirolisis. Pueden obtenerse diferentes combustibles tales como:

- Sólidos: Leña, astillas y carbón vegetal.
- Líquidos: Biocarburantes, aceites, aldehídos, alcoholes, cetonas y ácidos orgánicos.
- Gaseosos: Biogás e Hidrógeno.

Hace más de 100 años la biomasa de origen animal o vegetal era la fuente de energía más importante para la humanidad y en ella se basaba la producción industrial. Con el uso masivo de combustibles fósiles, el aprovechamiento energético de la biomasa fue disminuyendo progresivamente y en la actualidad presenta en el mundo un reparto desigual como fuente de energía.

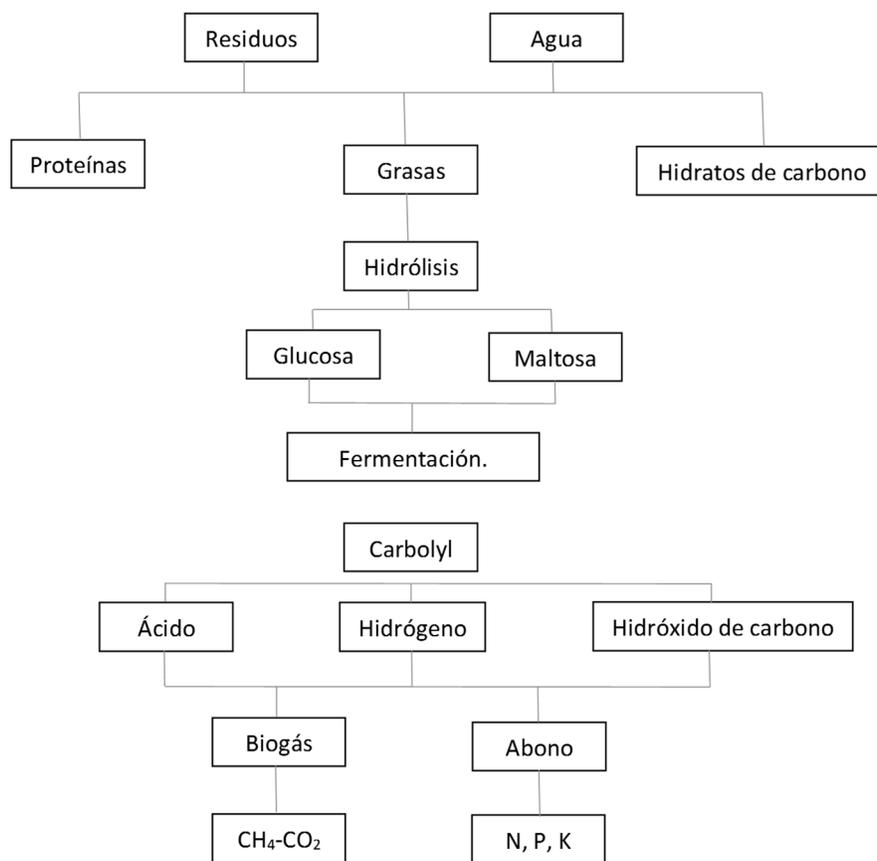
## **1.8. FERMENTACIÓN ANAERÓBICA.**

La fermentación es una transformación enzimática de compuestos orgánicos complejos en otros compuestos más simples, con la liberación de energía y generalmente asociado con desprendimiento de gas carbónico, por lo general, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Se considera como uno de los procesos más efectivos para la reducción de emisiones de efecto invernadero, así como el aprovechamiento de energía contenida en residuos orgánicos y el enriquecimiento del valor fertilizante de los residuos sólidos de la mezcla. Es un proceso complicado desde el punto de vista microbiológico, es por eso que se debe prestar especial atención a la forma en que se alimenta el biodigestor, ya que cualquier anomalía puede afectar el proceso e inhibirá el de descomposición. Debido a la presencia de una atmósfera libre de oxígeno, es posible transformar la biomasa alojada en el

interior del reactor en compuestos volátiles como el  $\text{CO}_2$  (Dióxido de carbono),  $\text{NH}_3$  (Amoniaco),  $\text{H}_2\text{S}$  (Ácido sulfhídrico),  $\text{N}_2$  (nitrógeno molecular),  $\text{CH}_4$  (Metano), entre otros gases. En este proceso intervienen las bacterias metanogénicas.

En la figura 1.1 se explica el antes y después de la fermentación, en la primera parte tenemos la mezcla de residuos orgánicos y agua, de esta mezcla, se puede destacar la presencia de compuestos orgánicos como los son proteínas, grasas e hidratos de carbono. Mediante una hidrólisis orgánica estos compuestos orgánicos se transforman en otros compuestos más simples, como los son la glucosa y maltosa, después de la fermentación se inicia un subproceso conocido como ciclo de carbono, donde, el grupo carbonilo al unirse con moléculas de hidrógeno libre forman ácidos e hidróxidos de los cuales sobresalen el metano y el dióxido de carbono.



**Figura 1.1.- Proceso de descomposición de los residuos.**

Fuente: Moncayo Romero, Gabriel. Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás.

Al acumular la materia orgánica en un medio acuoso, en la primera etapa del proceso, los microorganismos aerobios se alimentan del oxígeno que se pudiera encontrar en el reactor. Cuando el oxígeno se agota, el medio en el interior del biodigestor adquiere las condiciones óptimas para que la flora anaeróbica se pueda desarrollar, esta flora utiliza la materia orgánica como fuente de alimentación. A consecuencia de esto, y como parte de la respiración de las bacterias anaeróbicas, se genera una cantidad considerable de gases como metano, dióxido de carbono, hidrógeno y ácido sulfhídrico.

Este proceso puede aplicarse a materia orgánica proveniente de ganado, desecho agrícola, inclusive, a los residuos industriales de transformación de estos productos. Como ejemplo de estos residuos, podemos mencionar purines, estiércol, excedentes de cosechas, etc. También mediante la digestión anaeróbica se puede tratar las aguas residuales que contengan una alta carga orgánica, como las que se generan en muchas industrias alimentarias.

Algunos beneficios que podemos relacionar a la fermentación anaeróbica son:

- La reducción gradual de malos olores.
- Enriquecimiento mineral de los residuos de la fermentación.
- Producción de metano, que puede ser utilizado como combustible.
- Reducción de gases de efecto invernadero.

La fermentación anaeróbica puede contener uno o más residuos con la condición de que sean líquidos y que haya materia fermentable, además de que, la mezcla tenga una concentración estable.

La fermentación anaeróbica es ampliamente conocida, aunque, aun no se define exactamente el proceso químico que la causa, ni su microbiología. A pesar de ello,

teóricamente se han detectado principalmente cuatro etapas dentro del proceso, en las cuales la biomasa se degrada en moléculas más simples para dar como resultado final, la obtención de biogás y bioabono, a causa de los diferentes tipos de bacterias que actúan en el proceso.

La primera etapa es la hidrólisis, aquí comienza la transformación de la biomasa a causa de la acción de los microorganismos. La biomasa se hidroliza debido a la presencia de bacterias hidrolíticas que solubilizan las moléculas que son solubles en agua, tales como, grasas, proteínas y carbohidratos y los transforma en polímeros más simples. Por tanto la hidrólisis es la transformación de polímeros en sus respectivos monómeros. En esta etapa comienza a generarse  $\text{CO}_2$ .

La acidogénesis es la segunda etapa del proceso, los productos obtenidos en la fase anterior se transforman en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Estas dos etapas se llevan a cabo debido a la presencia de bacterias hidrolíticas-acidogénicas y acidogénicas que, hidrolizan y fermentan los compuestos más complejos de la biomasa para dar lugar a ácidos orgánicos simples, que normalmente es ácido acético. Estas bacterias son anaerobias facultativas, es decir, pueden consumir oxígeno diatómico para su metabolismo y bacterias estrictas, que estas por el contrario, no crecen si hay presencia de oxígeno. Por lo tanto ambas bacterias se complementan, las facultativas consumen el oxígeno libre, para dar lugar al desarrollo de las bacterias estrictas. En esta etapa el crecimiento bacteriano es alto.

La tercera etapa se denomina acetogénesis, en esta fase contamos con la presencia de bacterias acetogénicas, ellas se encargan de la degradación de los ácidos orgánicos, obtenidos en la acidogénesis, transformándoles en ácido acético y teniendo como productos hidrógeno y dióxido de carbono, que son sustratos de las bacterias metanogénicas.

La última etapa del proceso es la metanogénesis, en esta fase intervienen dos tipos de bacterias, ambas son metanogénicas estrictamente anaerobias, es decir que la presencia de oxígeno molecular las elimina. El primer grupo de bacterias se denominan metanogénicas acetoclásticas y se encargan de transformar los ácidos propanoico y acético. El segundo grupo son las bacterias metanogénicas hidrogenófilas, estas consumen el hidrógeno generado en la primera parte de la reacción, y lo convierten en biogás.

La tasa de crecimiento de las bacterias metanogénicas es cinco veces menor que la de la fase de acetogénesis, es por eso que, estas bacterias son las que limitaran el proceso de degradación anaerobia y condicionaran el tiempo de retención de la biomasa en el digestor.

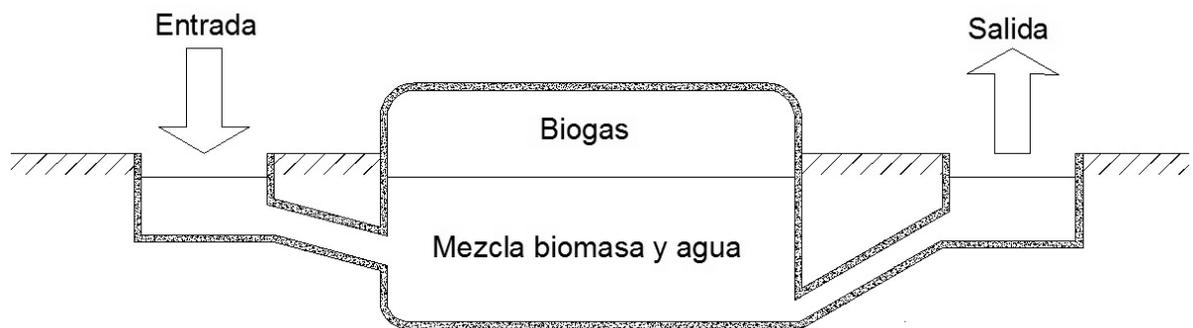
Las metanobacterias sólo se multiplican cuando está avanzada la fermentación de la biomasa por acción de las bacterias anaerobias facultativas (*Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella* o *Bacillus spp*), y se haya consumido todo el oxígeno disuelto de manera que el potencial redox haya alcanzado un valor menor que -330 mV. Además, el pH no debe bajar demasiado para no inhibir el crecimiento de los metanógenos.

# **CAPÍTULO 2**

## **BIODIGESTORES**

## 2.1. DEFINICIÓN DE BIODIGESTOR.

Los biodigestores son recipientes, también llamado reactores, cerrados herméticamente que permiten el almacenamiento de una carga (definida como afluente) de materia orgánica, (biomasa) para someterla a un proceso anaeróbico de descomposición. El reactor cuenta con un sistema de almacenamiento y extracción de biogás que se genera durante el proceso. Una vez terminado el proceso, estos recipientes permiten la extracción de los restos de biomasa, ahora en forma de bioabono. En la figura 2.1 se puede apreciar un esquema de un biodigestor.



**Figura 2.1.- Esquema general de un biodigestor.**

## 2.2. CLASIFICACIÓN.

Los biodigestores se pueden clasificar de distintas maneras, por ejemplo, por la periodicidad de la carga, por su forma, su posición con respecto al nivel del suelo, según el tipo de mezclado, según la dilución de la materia orgánica, entre otros.

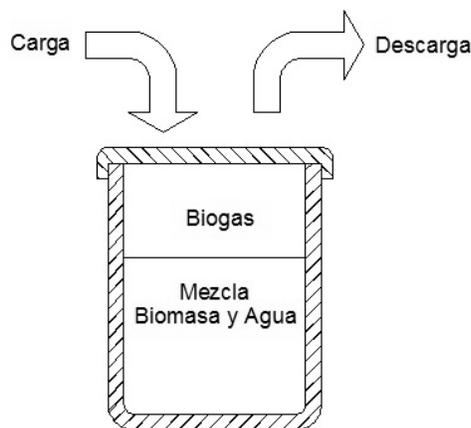
### 2.2.1. Por la periodicidad de la carga.

Según el periodo en el que los biodigestores son cargados, estos pueden ser clasificados en discontinuos, semicontinuos y continuos.

### 2.2.1.1. Biodigestores de carga Batch o discontinuos.

Este tipo de biodigestores, también llamados de lote, se cargan una sola vez de forma total o por etapas. La descarga se realiza cuando la materia orgánica se ha degradado por completo y ya no hay presencia de producción de biogás. Se puede ver en el esquema de la figura 2.2 que la carga y descarga se realiza por el mismo sitio. Se recomienda el uso de este tipo de biodigestores cuando se presentan problemas operativos debido a la falta de personal o cuando la obtención de materia orgánica no es constante. Esto obliga, a fin de mantener una producción de gas estable a lo largo del tiempo, a poseer por lo menos tres o cuatro digestores de este tipo, cada uno de los cuales, se hallará operando en las distintas etapas, lo que permite mantener la producción de biogás en un cierto nivel uniforme.

Las ventajas que ofrece la utilización de un biodigestor Batch, es que puede procesar una gran variedad de sustratos, la carga a suministrar puede obtenerse de campo abierto, porque aunque se incluya algún tipo de material inerte, este no entorpecerá el proceso de biodigestión, puede agregarse cargas secas que no absorben humedad, así como materiales que floten en el agua, no se requiere materia orgánica continua y no se necesita de una atención diaria. Las principales desventajas es el laborioso trabajo de carga y descarga que representa su operación.



**Figura 2.2.- Esquema general de un biodigestor tipo Batch.**

### **2.2.1.2. Biodigestores de régimen semicontinuo.**

Se utilizan generalmente en áreas rurales y en pequeñas granjas agrícolas. Son sistemas de uso doméstico. El periodo de carga es variable dependiendo de la disponibilidad de la materia orgánica y que pueden llegar a ser una vez al día o algunas veces al año, que generalmente coincide con el período de siembra para aprovechar el poder fertilizante de los residuos de la digestión y de los lodos fermentados, con volúmenes de mezcla que dependen del tiempo de retención. Un buen ejemplo de los biodigestores de régimen semicontinuo son los biodigestores horizontales como el que se muestra en la figura 2.3.



**Figura 2.3.- Biodigestor horizontal trabajando en régimen semicontinuo.**

Fuente: Moncayo Romero, Gabriel. Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás.

### **2.2.1.3. Biodigestores de régimen continuo.**

En este tipo de biodigestores, el volumen que ingresa desplaza una cantidad equivalente de efluente que se evacua por la salida, de este modo el volumen del substrato en la cámara de digestión se mantiene constante, se desarrolló principalmente para el tratamiento de aguas residuales y en la actualidad su uso se ha extendido al manejo de todo tipo de sustratos. Se les utiliza para plantas de biogás para la producción de energía eléctrica, como la que se observa en la figura 2.4. Son digestores de gran tamaño en los que se emplean equipos comerciales para su alimentación, para la agitación y control.



**Figura 2.4.- Planta de generación de biogás a gran escala.**

**Fuente: Moncayo Romero, Gabriel. Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás.**

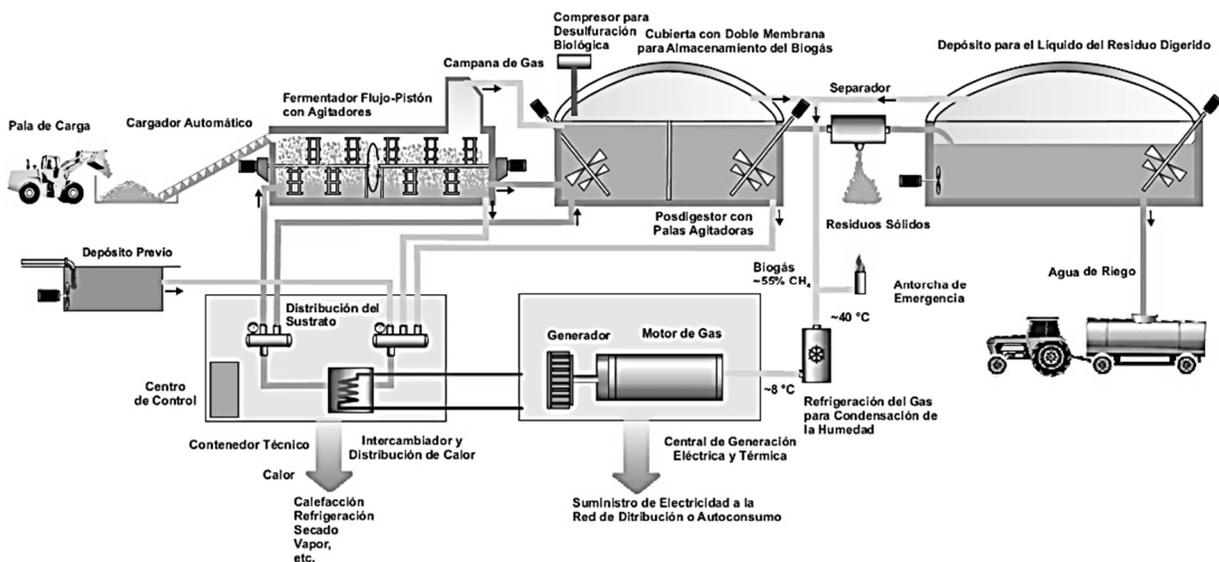
Son los más utilizados en Europa y en plantas industriales en Latino América. Estas plantas se cargan diariamente en forma periódica, la biomasa debe ser fluida y homogénea. Estas plantas pueden automatizarse con facilidad.

Permiten controlar la digestión, con el grado de precisión que se requiera. Permiten corregir cualquier anomalía que se presente en el proceso. Permite manejar las variables relacionadas, carga volumétrica, tiempo de retención y temperatura a largos periodos. La tarea de puesta en marcha sólo se vuelve a repetir cuando hay que vaciarlo por razones de mantenimiento. Las operaciones de carga y descarga de la biomasa y fertilizante no requieren ninguna operación especial.

Las desventajas de este tipo de biodigestores son la baja admisión de concentración de sólidos, no poseer un diseño apropiado para tratar los sustratos fibrosos, o aquellos cuyo peso específico sea menor que el del agua. En ocasiones tienen problemas de limpieza de sedimentos, espuma e incrustaciones. Para mejorar la producción de metano en este tipo de biodigestores, es conveniente disponer de la cantidad y calidad adecuada de sólidos volátiles.

La mezcla de desechos debe de tener una cantidad balanceada de carbono nitrógeno, que sea homogénea, que no tenga impurezas como trozos de materia mayores a 1 cm<sup>3</sup>, que tenga niveles de pH balanceados y que posea una alta cantidad de organismos metanizantes y metanizables.

Alimentando estos biodigestores con mezclas de distinta calidad se han obtenido resultados bastante satisfactorios. Los biodigestores industriales de gran tamaño no sólo tienen en cuenta la temperatura de la biomasa, o el pH, si no la cantidad y calidad de los sólidos volátiles que se ingresa, teniendo en cuenta que esta es parte integrante de cualquier tipo de biomasa. A continuación en la figura 2.5 se muestra el proceso que se lleva a cabo en una planta de biogás.



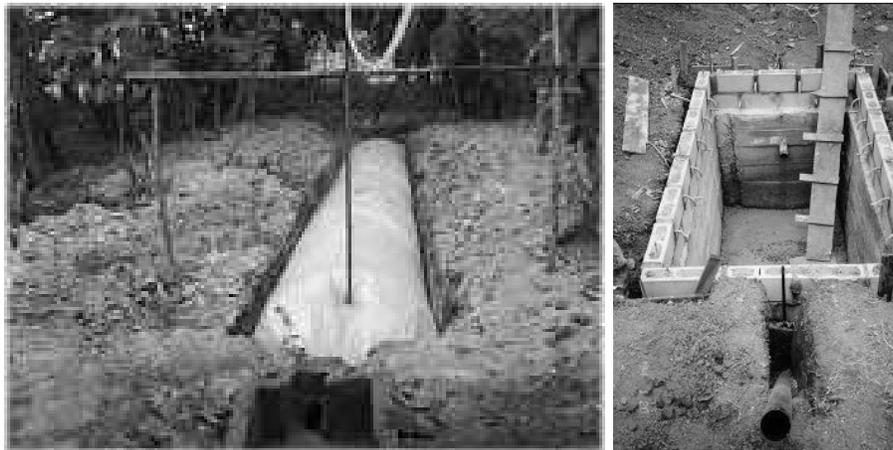
**Figura 2.5.- Esquema de una planta de biogás.**

Fuente: <http://www.inpper.es>

### 2.2.2. Según su forma.

Tomando como referencia lo establecido por el Ing. Antonio Guevara Vera en su obra “*Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*”, se puede establecer diversos factores para clasificar los biodigestores. Uno de ellos puede ser de acuerdo a su geometría de construcción, la geometría hace referencia específicamente a la parte del biodigestor donde se lleva a cabo la reacción, denomina cámara de digestión.

Tomando en cuenta lo anterior, los biodigestores se clasifican en cilíndricos, ovalados; que suelen ser fabricados de hules especiales en forma de bolsa como el que se ve en la figura 2.6 (izquierda), rectangulares regularmente se construyen de ladrillo o concreto como el de la figura 2.6 (derecha) y cuadrados.



**Figura 2.6.- Biodigestor ovalado (izquierda) y construcción de un biodigestor rectangular (derecha).**

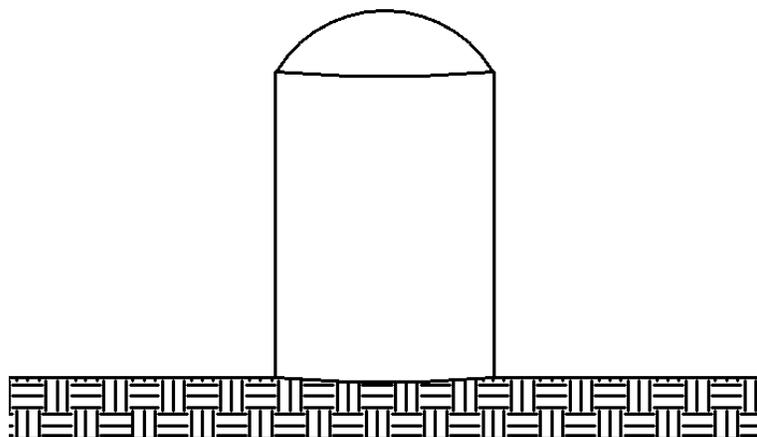
**Fuente:** Guevara, Antonio. *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*.

### 2.2.3. Según su posición.

De acuerdo a su posición de instalación con respecto a la superficie o nivel del suelo, los biodigestores se pueden clasificar en superficiales, semienterrados y enterrados.

### 2.2.3.1. Superficiales.

En este tipo de biodigestores todos los elementos constitutivos del biodigestor se encuentran por encima de la superficie terrestre, un esquema de representativo de estos biodigestores puede ser apreciado en la figura 2.7.

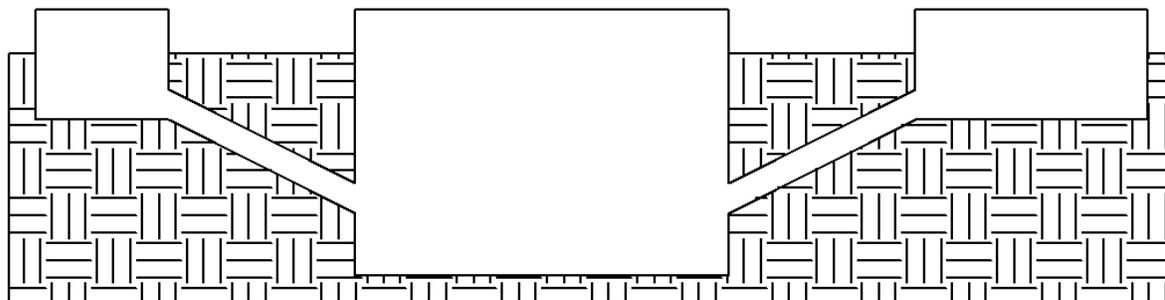


**Figura 2.7.- Biodigestor superficial.**

Fuente: Guevara, Antonio. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales.

### 2.2.3.2. Semienterrados.

En estos biodigestores, la entrada de materia orgánica, la salida de gas y la salida de lodos activos permanecen por encima de la superficie terrestre, mientras que la cámara de digestión se encuentra por debajo del nivel del suelo, como se observa en la figura 2.8.

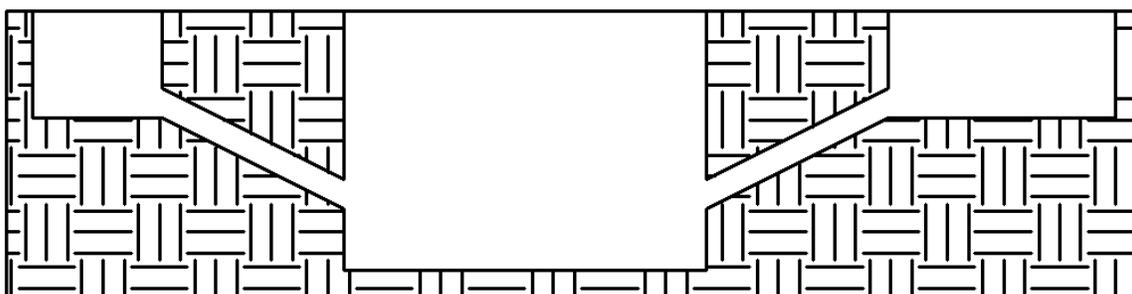


**Figura 2.8.- Biodigestor semienterrado.**

Fuente: Guevara, Antonio. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales.

### **2.2.3.3. Subterráneos.**

Los biodigestores subterráneos son aquellos en los que todos los elementos que lo componen se encuentran por debajo del nivel del suelo, como lo muestra el esquema de la figura 2.9.



**Figura 2.9.- Biodigestor Subterráneo.**

Fuente: Guevara, Antonio. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales.

### **2.2.4. Según el tipo de mezcla.**

En base a la calidad del mezclado de la carga se pueden dividir en completamente mezclados o parcialmente mezclados.

#### **2.2.4.1. Biodigestores completamente mezclados.**

En estos digestores se busca que el substrato en fermentación dentro de la cámara se mezcle en forma total, en general diariamente. En el caso de los reactores calefaccionados, esta acción asegura una distribución uniforme de la temperatura en todo el volumen.

A diferencia de los biodigestores anteriormente mencionados, estos sistemas requieren menores tiempos de retención (10 a 30 días). Son aplicados a residuos con alto porcentaje de sólidos totales, a fin de lograr un mayor contacto entre la biomasa microbiana y el sustrato. La principal desventaja de estos digestores es la baja velocidad de carga con la que pueden ser operados y la complejidad del sistema de mezclado, sobre todo en su

construcción y mantenimiento. Este tipo de biodigestores se construyen con acero u hormigón, Son mezclados por agitadores de hélice o paleta, trabajan en rangos de temperatura mesofílica y termofílica y se utilizan para degradar desechos sólidos de manera eficiente. Tienen altos costos de construcción y operación, pero un elevado rendimiento de metano. Este tipo de biodigestores se construyen mayormente en Europa. Se construyen principalmente en sitios donde se tiene poco espacio. Se debe tener mucho cuidado en la intensidad y periodicidad de la agitación, para no afectar el delicado equilibrio bacteriano.

#### **2.2.4.2. Biodigestores de mezclado parcial.**

En este grupo se encuentran los pequeños digestores rurales en los cuales los métodos de agitación son muy rudimentarios (agitadores del tipo manual o rotación de la campana gasométrica). Los que se realizan con el fin de evitar la formación de la perjudicial costra.

En otros casos como los digestores del tipo horizontal la agitación se logra mediante la circulación del substrato dentro de la cámara de digestión provista de una serie de tabiques.

#### **2.2.5. Según la dilución de la carga.**

Si la dilución de la carga es baja podemos decir que tenemos biodigestores de digestión seca, en cambio si la dilución es mayor se habla de biodigestores de digestión húmeda.

##### **2.2.5.1. Biodigestores de digestión seca.**

Este tipo de digestión es referido al proceso de la degradación de residuos orgánicos con concentraciones de sólidos totales del orden del 20% o superior. La fermentación en seco, generalmente se aplica sólo en procesos industriales. La definición “seca” no es

técnicamente muy clara ya que siempre se utiliza un medio acuoso para la digestión anaeróbica. Las principales ventajas de este sistema son:

- Bajos consumos de agua. Solamente se requiere una mínima cantidad de agua para llevar a cabo el proceso.
- El volumen del biodigestor es relativamente pequeño, debido a la alta densidad de la materia orgánica con la que es operado.
- Los requerimientos energéticos para mantener una temperatura controlada en el sistema son bajos.

#### **2.2.5.2. Biodigestores de digestión húmeda.**

Si se trata de un proceso de fermentación húmeda, se habla de una mezcla con un porcentaje de masa seca menor o igual a 15% del total de la mezcla. La fermentación húmeda es la más utilizada en Europa y Latino América.

#### **2.2.6. Biodigestores de dos etapas.**

Existen múltiples combinaciones de biodigestores de dos etapas. La concepción de estos sistemas está basada en el hecho de que varios grupos de bacterias involucradas en el proceso de descomposición de la materia orgánica compleja, requieren de diferentes condiciones de pH y tiempo de retención para su óptimo crecimiento. En estos sistemas, en el primer biodigestor ocurre la hidrólisis y acidogénesis de la materia orgánica compleja, mientras que en el segundo se lleva a cabo la acetogénesis y metanogénesis del material acidificado. Las variantes estudiadas de estos sistemas de doble etapa presentan como desventaja, los largos tiempos de retención hidráulica requeridos en la primera fase del tratamiento y las bajas eficiencias de degradación. Aun con la aplicación de digestores de alta tasa en la segunda fase, la velocidad de conversión total y la eficiencia global es determinada por la etapa de la hidrólisis y acidificación.

### **2.2.7. Biodigestores de contacto anaeróbico.**

En estos digestores la pileta de sedimentación a la salida de los mismos le da la posibilidad a las bacterias que han salido con el efluente a asentarse y decantar para luego ser reintroducidas en forma de lodo, mezclado con material de carga como inóculo.

Existen también otros dos métodos para retener la masa bacteriana a la salida del reactor, como puede ser un sedimentador externo en el cual las partículas más pesadas son recirculadas.

Otro puede ser un separador de membranas, que no hace otra cosa que filtrar las bacterias, proceso que se realiza mediante un bombeo externo del lodo de la parte inferior hacia la superior.

## **2.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.**

La cantidad del biogás producido depende de varios factores, principalmente de la cantidad de materia orgánica disponible, del grado de biodegradabilidad de la misma, de la temperatura dentro del digestor, la presencia de bacterias metanogénicas, la proporción apropiada líquido-sólido, de la proporción de Carbono-Nitrógeno (C/N) y del régimen de carga del digestor.

### **2.3.1. Masa seca (Ms).**

Se define a la masa seca (Ms) como la cantidad de materia sólida que contiene la biomasa. El porcentaje óptimo de materia sólida en la mezcla contenida dentro del biodigestor, debe ser del rango de 8 al 12%. Esta proporción se logra mezclando la materia orgánica con agua.

La dilución de la materia orgánica es importante para generar un mejor ambiente para las bacterias en el sustrato. Cuando la mezcla sobrepasa el 15% de materia seca, en biodigestores a gran escala, se vuelve complicada las labores de bombeo, también se dificulta el proceso de agitación de la mezcla, requiriendo mayores cantidades de energía para hacerlo.

Cuando la mezcla dentro del biodigestor supera el 20% de materia sólida, se dice que tenemos un proceso de fermentación seca. Bajo esta condición, la operación del biodigestor se vuelve difícil de operar y requiere una permanente atención.

Para el cálculo de masa seca se debe utilizar el siguiente procedimiento:

De la materia orgánica a utilizar, se extrae una muestra, la cual se debe pesar, para posteriormente secarla en un horno a 105 °C durante un tiempo de 48 horas.

$$\text{Humedad (\%)} = \left[ \frac{(P_1 - P_2)(100)}{P_1} \right] \quad \text{(Ecuación 2.1)}$$

Donde:

$P_1$  = Peso de la muestra antes de secar (peso en gramos).

$P_2$  = Peso de la muestra después de secar (peso en gramos).

$$\text{Masa seca (\%)} = 100 - \text{Humedad} \quad \text{(Ecuación 2.2)}$$

### 2.3.2. Masa Volátil (Mv).

El término masa volátil hace referencia al porcentaje de materia orgánica que contiene la biomasa. Para determinar la masa volátil es necesario someter la masa seca a un proceso de incineración durante seis horas a 550 °C. Las cenizas resultantes de la incineración serán la cantidad de sólidos inorgánicos no volátiles. Solamente los sólidos

orgánicos se volatizan durante esta prueba. El secado se debe realizar en un horno o mufla de laboratorio.

Es importante determinar el valor de masa volátil, ya que este porcentaje es el contenido real de masa orgánica en la biomasa, el resto sólo se trata de material que no produce biogás.

El cálculo para obtener la masa volátil es el siguiente:

$$Masa\ Volatil\ (\%) = \left[ \frac{(Ms - ceniza)(100)}{Ms} \right] \quad \text{(Ecuación 2.3)}$$

Los valores de masa seca y ceniza deben estar expresados en gramos.

### **2.3.3. Carga orgánica volumétrica (COV).**

Se define como carga orgánica volumétrica (COV) a la proporción de materia volátil por m<sup>3</sup> que ingresa diariamente al biodigestor (en el caso de biodigestores continuos). Se interpreta en unidades de kg de MV/m<sup>3</sup> de biodigestor. Este valor depende de factores como la temperatura al interior del reactor y del tiempo de retención hidráulica (TRH). La COV es considerada como un parámetro para controlar la carga del biodigestor y es un factor determinante para el dimensionamiento del mismo. Si el sustrato está muy diluido, las bacterias no tendrán el suficiente alimento para crecer, en cambio, si hay un exceso de materia sólida, disminuye la movilidad de los microorganismos y como resultado, la efectividad del proceso también se verá afectada.

Se recomiendan valores de COV en un rango de 2 a 3 kg/m<sup>3</sup>. A valores mayores de ese rango se puede apreciar una disminución del proceso de degradación y como consecuencia, la disminución en la producción de biogás.

#### **2.3.4. Ausencia de oxígeno.**

Las bacterias metanogénicas son de los seres vivos más antiguos que existen. Datan de hace 3 o 4 billones de años, cuando no existían las condiciones atmosféricas que hoy conocemos. Es por eso que estas bacterias sólo sobreviven en ambientes anaerobios. A pesar de ello estas no mueren instantáneamente ante la presencia de oxígeno debido a que viven en conjunto con bacterias que se formaron en procesos previos. Aun así, el efecto inhibitor del oxígeno no es permanente, ya que en la flora bacteriana existen microorganismos facultativos que consumirán el oxígeno que se pueda encontrar en el medio. Mientras el contenido de oxígeno en el reactor sea del rango de 3 - 5 % puede desarrollarse el proceso anaeróbico sin consecuencias negativas.

#### **2.3.5. Concentración de la carga.**

La producción de biogás está relacionada con el tipo de biomasa que depositamos al interior del reactor. La cantidad de biogás producido depende de la cantidad de grasas, proteínas, hidratos de carbono y nutrientes que contenga la biomasa.

Además de elementos que aporten carbono y nitrógeno, la fermentación anaeróbica requiere de sales minerales como azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel, entre otros.

Generalmente la biomasa con alto contenido de grasas, proteínas e hidratos de carbono, sugiere una mayor producción de biogás. Normalmente los estiércoles contienen estos elementos en proporciones adecuadas, pero cuando se maneja ciertos desechos agroindustriales, en ocasiones, es necesario aportar nutrientes que estabilicen la mezcla.

### **2.3.6. Temperatura.**

El rango de temperaturas para la fermentación anaeróbica tiene tres rangos. Un rango psicrófilico (por debajo de 25°C), mesófilico (entre 25 y 45 °C) y otro termófilico (entre 45 y 60 °C). En la mayoría de los casos el rango mesófilico es el que presenta mejor eficiencia y se obtiene una óptima digestión a una temperatura de 35 °C. Las bacterias presentes en cada uno de estos rangos son distintas y cada una presenta una cierta sensibilidad a los cambios de temperaturas, las bacterias psicrófilas tienen una sensibilidad de  $\pm 2^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ , las mesófilas de  $\pm 1^{\circ}\text{C}/\text{hora}$  y las termófilas las más sensibles de todas, tiene una sensibilidad de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ .

La producción de biogás, en ausencia de inhibidores, aumenta con la temperatura, ya que aumenta la tasa de reproducción de las bacterias, pero se requieren equipos más sofisticados para proporcionar a las bacterias la temperatura adecuado sin sufrir un cambio térmico muy brusco dada su sensibilidad, en cambio, temperaturas más bajas implican tiempos de retención más largos y como consecuencia mayores volúmenes de digestor.

### **2.3.7. pH.**

Este parámetro de control es uno de los más importantes, debido a que los organismos metanogénicos presentan una gran sensibilidad a las variaciones del mismo. Si el rango de pH está dentro de 6.5 y 7.5 se consigue un buen rendimiento de degradación de la biomasa y una alta obtención de metano. La digestión comienza a inhibirse a valores menores a 6.5. Los ácidos grasos volátiles y los acetatos tienden a disminuir este valor de la mezcla. Hay varios productos químicos que pueden ser útiles para controlar el pH. Algunos ejemplos son:

- Cal hidratada  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

- Cal virgen  $\text{CaO}$ .
- Carbonato de sodio  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .
- Bicarbonato de sodio  $\text{NaHCO}_3$ .
- Hidróxido de sodio  $\text{NaOH}$ .
- Bicarbonato de amonio  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ .

Estos productos químicos pueden ser diferenciados en dos grupos:

- Los que ofrecen alcalinidad bicarbonática directamente como el hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio o bicarbonato de amonio.
- Los que reaccionan con biogás carbónico para formar alcalinidad bicarbonática como la cal virgen o cal hidratada.

Por lo regular se utiliza la cal para reducir el pH, por ser más barata y fácil de conseguir, pero por ser un compuesto insoluble puede ocasionar serios problemas en la operación.

### **2.3.8. Tiempo de retención hidráulica (TRH)**

El TRH se define como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de la carga diaria. El TRH determina el tiempo de permanencia de la biomasa en el interior del reactor hasta su descarga.

No hay parámetro exacto que defina el tiempo de retención, este valor está en función de la temperatura ambiental y de la carga orgánica volumétrica del biodigestor. También está en función de la degradabilidad de la biomasa, materia de fácil degradación requiere un menor tiempo de retención. El TRH sólo puede ser claramente definido en los biodigestores tipo batch (un llenado, una descarga), donde el TRH es igual al tiempo de permanencia del sustrato dentro del biodigestor.

### 2.3.9. Relación de Carbono-Nitrógeno (C/N) de la carga.

El consumo de carbono es superior a la del nitrógeno en forma amoniacal en una relación de C/N=30:1, cuando la relación es muy estrecha (por ejemplo 10:1) hay pérdidas de nitrógeno asimilable, lo cual reduce la calidad del material digerido. Si la relación es muy amplia (40:1) se inhibe el crecimiento debido a la falta de nitrógeno. Si hay demasiado carbono en la materia a fermentar el proceso se hace más lento y tiende a acidificarse. Si hay demasiado nitrógeno, éste se perderá como amoníaco, elevando el pH y reduciendo el poder fertilizante y nutriente de los lodos efluentes. En la tabla 2.1 se da la relación C/N de la materia orgánica empleada comúnmente en el proceso de fermentación anaeróbica.

**Tabla 2.1.- Relación C/N de materia orgánica empleada comúnmente.**

<b>MATERIA ORGÁNICA</b>	<b>RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO (C/N)</b>
Cacahuates tallos y hojas	19:1
Excremento de aves	32:1
Excremento fresco de borrego	29:1
Excremento fresco de caballo	24:1
Excremento fresco de cerdo	13:1
Excremento fresco de conejo	19:1
Excremento fresco de gallina	11:1
Excremento fresco de vaca	25:1
Excretas frescas humanas	2.9:1
Hojas secas	41:1
Paja seca de arroz	67:1
Paja seca de trigo	87:1
Pasto	27:1
Restos de comida	15:1
Tallo del maíz	53:1

**Fuente: Guevara, Antonio. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales (Modificada).**

Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás mediante fermentación anaeróbica, pero la calidad y cantidad de este dependerá de la composición de la biomasa utilizada. Las fuentes principales de alimentación de las bacterias generadoras de metano son el carbono y el nitrógeno; El carbono es la fuente de energía y el nitrógeno influye en la formación de nuevas células. Los principales alimentos de las bacterias anaeróbicas son el carbono, en forma de carbohidratos, y el nitrógeno, en forma de proteínas, nitratos, amoníaco, etc).

El carbono se utiliza para obtener energía y el nitrógeno para la construcción de estructuras celulares. Las bacterias utilizan carbono con una rapidez treinta veces mayor que su uso de nitrógeno. Si la C/N es alta, el nitrógeno se consumirá rápidamente por las bacterias metanogénicas para formar proteínas y no reaccionará con el material restante, por lo tanto la producción de gas será alta. Si no existe suficiente nitrógeno para permitir que las bacterias se multipliquen, la velocidad de producción de gas se verá afectada. Al existir nitrógeno en exceso se produce amoníaco el cual, en grandes cantidades, es tóxico e inhibe el proceso.

#### **2.3.10. Agitación y mezclado.**

La agitación de los biodigestores tiene diversos objetivos como poner en contacto el sustrato fresco o afluente con la población bacteriana, y eliminar los metabolitos producidos por los metanogénicos al favorecer la salida de los gases; proporcionar una densidad uniforme de población bacteriana; prevenir la formación de capa superficial de costras (inhiben el proceso y no dejan que el biogás salga a la superficie) y de espumas, así como la sedimentación en el digestor; prevenir la formación de espacios muertos que reducirán el volumen efectivo del digestor, y la formación de caminos preferenciales en función de hidráulica del sistema; eliminar la estratificación térmica, manteniendo una temperatura uniforme en todo el digestor.

Los efectos buscados con la agitación son: remoción de las burbujas de biogás producidos por las bacterias metanógenas, mezclando del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra que se forma dentro del digestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica.

## 2.4. BIODIGESTORES EN EL MUNDO.

El sistema de biodigestión más grande del mundo, se encuentra ubicado en el noreste de Hungría, esta planta se puede apreciar en la figura 2.10, la firma alemana Franz Eisele und Soehne, Pumpen und Mashinenfabrik, construyó el complejo de biodigestores dedicado a actividades agropecuarias más grande del mundo.



**Figura 2.10.- Planta de biodigestión en Hungría.**

Fuente: <http://www.eisele.de>

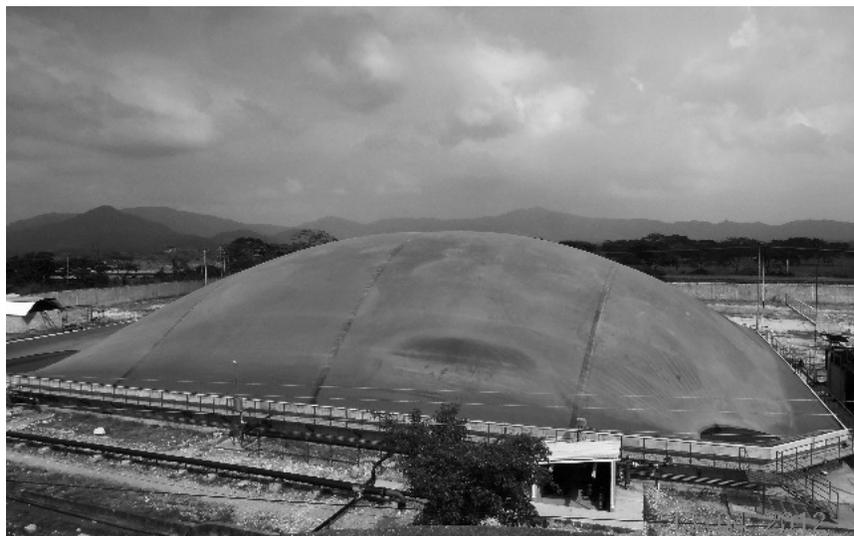
La planta de biogás en Nyirbator, al noreste de Hungría, es suministrada de materia orgánica por dos grandes proveedores, un matadero ubicado a menos de 200 metros al norte de las instalaciones y una granja con 2700 vacas lecheras. Alrededor de 100 m<sup>3</sup> al día de estiércol (aproximadamente 50 toneladas de estiércol sólidos) y por lo menos 300 m<sup>3</sup> de desechos líquidos de los residuos de 20000 pollos sacrificados es la capacidad de procesamiento diario de esta planta, 146000 m<sup>3</sup> anuales aproximadamente.

En un periodo comprendido de Enero a Noviembre del 2003, año de inauguración, se produjeron 5000 MW-hora de electricidad y aproximadamente 8700MW de calor. El excedente de energía es suministrado a la red pública por lo que se ahorra 40000 euros al mes aproximadamente.

En la actualidad, el tema de la biodigestión ha tomado auge a nivel mundial, Latinoamérica no es la excepción, puesto que aunque relativamente es joven en la materia, ya se encuentran en funcionamiento plantas de generación de biogás. Algunos ejemplos son<sup>1</sup>:

- **El Pazo, Venezuela.**

En 2012, se concluyó la construcción de un sistema de generación de biogás llamado el Pazo, ubicada en La Miel, estado de Lara, Venezuela. Este biodigestor se muestra en la figura 2.11 y forma parte del matadero “Carnes el Pazo” y es considerado el biodigestor más grande de Latinoamérica.



**Figura 2.11.- Biodigestor El Pazo.**

Fuente: <http://www.aqualimpia.com>

---

<sup>1</sup> Estos datos han sido retomados de los informes de AquaLimpia Engineering, empresa alemana dedicada al diseño y construcción de sistemas de generación de biogás, con presencia principalmente en Europa y Centro América.

Su fuente orgánica proviene de las aguas residuales producto de la matanza en promedio de 800 cabezas de ganado vacuno, 2000 de ganado porcino y 400 de ganado caprino por día, obteniendo así, un estimado de 2200 m<sup>3</sup> diarios de aguas residuales.

Este biodigestor tiene un volumen de 15000 m<sup>3</sup> y cubre un área territorial de 2856 m<sup>2</sup>. Las paredes están construidas de hormigón armado y está cubierto con una membrana flexible AQFlex<sup>2</sup>.

- **San Francisco, Ecuador.**

La empresa productora de leche, San Francisco se encuentra ubicada al norte de Latacunga, Ecuador. Dentro de las mismas instalaciones, se encuentran 50 hectáreas de plantación de rosas de exportación. Anteriormente, los desechos provenientes del establo eran vertidos al aire libre, lo que provocaba malos olores y la proliferación de moscas y roedores. El principal objetivo de la construcción del biodigestor era reducir el impacto ambiental y producir fertilizante orgánico de alta calidad para utilizarlo en los rosales.



**Figura 2.12.- Biodigestor San Francisco.**

Fuente: <http://www.aqualimpia.com>

---

<sup>2</sup> La membrana Flexible AQFlex están compuestas de propileno, dieno, monómero, negro humo, etileno y aceites agentes de vulcanización.

La empresa cuenta con un ganado estimado de 500 cabezas de vacas lecheras, que diariamente generan 20 toneladas de estiércol diario. Se recomendó hacer una codigestión de 10 toneladas diarias de gallinaza para mejorar la relación carbono-nitrógeno. Parte del biodigestor San Francisco se puede observar en la figura 2.12.

El biodigestor cuenta con un tanque de mezcla, fermentador de 1300 m<sup>3</sup>, tanque de descarga, lecho de secado de lodos, sistema de purificación de biogás, antorcha y un generador de 70 kW.

- **Magdalena, Guatemala.**

El ingenio azucarero Magdalena, ubicado en el km 99.5 de la carretera Sicapate, en Guatemala, cuenta con 4 biodigestores con un volumen útil de 27000 m<sup>3</sup> cada uno, construidos en acero. Estos biodigestores generan 75000 m<sup>3</sup> diarios de biogás. Parte de este complejo se puede ver en la figura 2.13.



**Figura 2.13.- Biodigestores Magdalena.**

Fuente: <http://www.aqualimpia.com>

- **Agrosania, El Salvador.**

Agrosania S.A. de C.V., es una empresa productora de leche localizada en el km 49.5 de la carretera a Sonsonate en El Salvador. La empresa cuenta con 49 hectáreas y una planta procesadora de leche, módulos de crianza y engorada porcina. En 2011 iniciaron la

construcción de 2 biodigestores tipo laguna con cubierta de membrana AQFlex con muro perimetral de hormigón con una capacidad de 1200 m<sup>3</sup>. En la figura 2.14 se observa al primero de estos biodigestores concluido.



**Figura 2.14.- Biodigestor 1 terminado.**

Fuente: <http://www.aqualimpia.com>

Actualmente se encuentra en funcionamiento uno de los dos biodigestores, produciendo biogás que alimenta a un generador de electricidad de 100 kW y el biogás restante sirve para reemplazar el gas LP que servía de combustible para las calderas.

- **México.**

En nuestro país, de 2007 a 2010 la SAGARPA<sup>3</sup>, por medio del Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), ha destinado 300 mdp para la construcción de 305 biodigestores.

Tomando como ejemplo una granja porcina en Puebla, ubicada en la comunidad de Santa María Zacatepec, que transforma 10 toneladas de excremento de 5000 cerdos en 400 m<sup>3</sup> de biogás al día generando 490 kW. El titular de FIRCO, Rodrigo Díez de Sollano, declaró que esta energía al mes, genera más de 14700 kW. La extracción de biogás se realiza mediante ductos como el que se aprecia en la figura 2.15.

---

<sup>3</sup> Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

Tan sólo en 2010, se instalaron 139 biodigestores, de los cuales, 59 son generadores de electricidad.



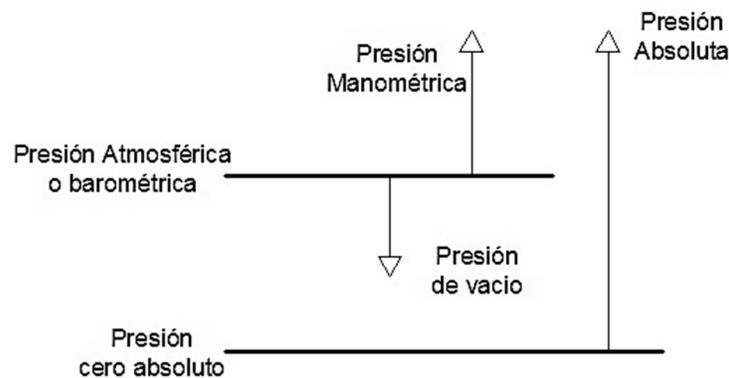
**Figura 2.15.- Planta de biogás Santa María Zacatepec.**  
Fuente: <http://www.sagarpa.gob.mx>

# **CAPÍTULO 3**

## **EQUIPOS DE MEDICIÓN**

### 3.1. MANÓMETRO.

La presión puede ser medida tomando como referencia cualquier punto arbitrario. Las referencias más usuales son la presión cero absoluto y la presión atmosférica local. Cuando se expresa una presión como una diferencia entre su valor y el cero absoluto, se llama presión absoluta. Cuando se expresa como una diferencia entre su valor y la presión atmosférica local, se llama presión manométrica. Estas escalas se pueden observar en la figura 3.1.



**Figura 3.1.- Escalas de presión según sus puntos de referencia.**

El manómetro es un instrumento que permite realizar la medición de la presión que ejerce un fluido. El manómetro relaciona el cambio de presión a un cambio en la elevación de un fluido estático, llamado líquido manométrico. Esta relación queda definida mediante la ecuación 3.1:

$$\Delta P = \rho g h \quad \text{(Ecuación 3.1)}$$

Los manómetros pueden clasificarse según el tipo de presión que miden, esta puede ser la presión atmosférica, la cual es medida con el barómetro. La presión relativa es posible medirla gracias a los manómetros, estos instrumentos miden las sobrepresiones, es decir, las presiones positivas. Por otro lado, las depresiones o presiones negativas son medidas por instrumentos llamados vacuómetros. También hay manómetros que miden diferencias de presión llamados manómetros diferenciales.

Los manómetros también se clasifican de acuerdo a su principio de funcionamiento. Los hay mecánicos y eléctricos. El principio de funcionamiento de los manómetros mecánicos consiste en igualar la fuerza que origina la presión que se intenta medir con otra fuerza. Esta fuerza puede ser producto de una columna de líquido, de un resorte en los manómetros clásicos o con la fuerza ejercida sobre la cara de un émbolo cuando se trata de un manómetro de émbolo. En los manómetros eléctricos, la presión origina una deformación elástica que genera una diferencia de potencial. El grado de exactitud de cada manómetro depende del tipo, la calidad de construcción, instalación y su adecuada lectura.

### 3.1.1. Barómetro.

El barómetro de mercurio consta de un tubo de vidrio lleno de mercurio, cerrado en un extremo, e invertido, de este modo, el lado abierto del tubo queda sumergido en mercurio, como se aprecia en la figura 3.2. Este tubo está especialmente graduado, de tal forma que se pueda determinar la altura de la columna de mercurio. La parte que queda libre de mercurio dentro del tubo de vidrio contiene vapor de mercurio. A pesar de que el vapor de mercurio cambia en función a la temperatura, en condiciones atmosféricas las variaciones son mínimas y se pueden despreciar.

Si la presión del vapor de mercurio está dada en milímetros de mercurio y la altura del mercurio se mide en las mismas dimensiones, la presión atmosférica se puede determinar mediante la ecuación 3.2:

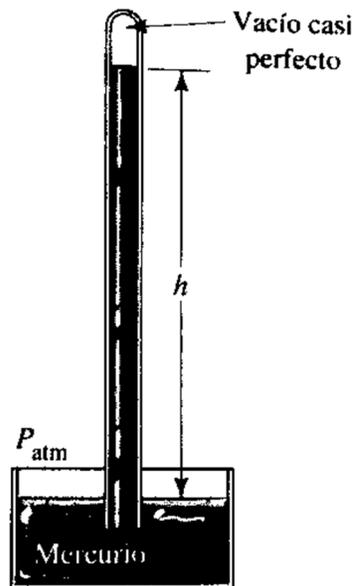
$$h_v + h_{Hg} = h_{atm} \quad \text{(Ecuación 3.2)}$$

Donde:

$h_v$  → Altura de vapor de mercurio.

$h_{Hg}$  → Altura de mercurio.

$h_{atm}$  → Presión atmosférica en columna de mercurio.

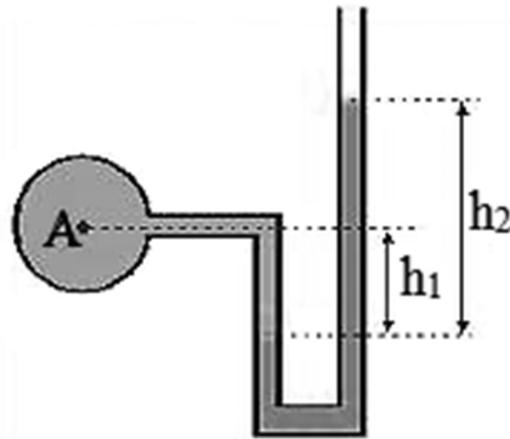


**Figura 3.2.- Barómetro de Mercurio.**  
Fuente: Mott, Robert. Mecánica de fluidos.

### 3.1.2. Tubos piezométricos.

Es un tubo transparente que puede ser de plástico o vidrio, es recto y puede presentar un codo en su extremo inferior, el diámetro de este tubo no debe ser menor de 5 mm, ya que de serlo, puede presentar problemas debido a la capilaridad provocada por la tensión superficial del líquido que este contenido dentro del tubo.

Los tubos piezométricos son de gran ayuda cuando se requiere medir una presión manométrica que no sobrepase la presión atmosférica, son cómodos de fabricar, no necesita de un líquido manométrico y utiliza el mismo líquido del cual se necesita saber su presión. Este tubo debe estar graduado, ya que es necesario saber el diferencial de altura que hay entre el orificio piezométrico y la columna de líquido dentro del tubo piezométrico.



**Figura 3.3.- Diagrama de un tubo piezométrico.**

Fuente: <http://oceanologia.ens.uabc.mx>

Mediante la ecuación 3.3 se puede determinar la presión medida por un tubo piezométrico:

$$P = \rho gh \quad \text{(Ecuación 3.3)}$$

Donde:

$P$  → Presión manométrica.

$\rho$  → Densidad del líquido en estudio.

$g$  → Gravedad.

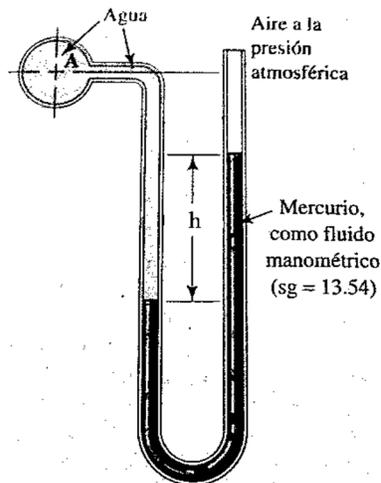
$h$  → Diferencial de altura.

Cuando el líquido en estudio se encuentra en movimiento (Por ejemplo, un líquido que fluye a través de una tubería.) se deben tener en cuenta que el tubo piezométrico se debe localizar de manera perpendicular a la corriente del líquido, esto evitara que el la energía dinámica se convine con la energía de presión variando así la lectura del tubo piezométrico.

### 3.1.3. Manómetro en U.

El manómetro más simple es el denominado manómetro en U. Se le llama así debido a que el tubo que contiene el líquido manométrico tiene forma de la letra u, como el del esquema de la figura 3.4. Un extremo del manómetro está conectado a la presión que se desea medir, y el otro extremo queda expuesto a la atmósfera.

El líquido manométrico se desplaza de su posición normal por causa de la presión que se está midiendo. Esta diferencia de alturas deberá ser sustituida en la ecuación 3.1, y de esta forma se obtendrá el valor de la presión que se desea saber.

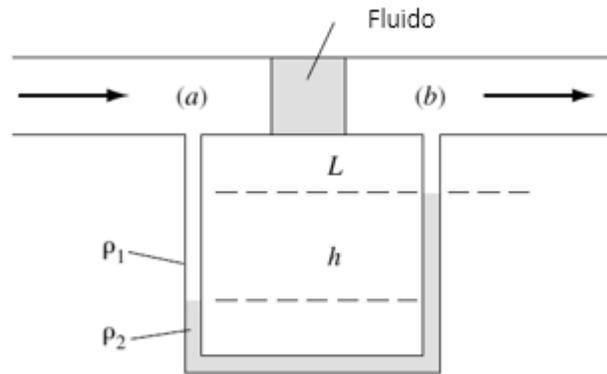


**Figura 3.4.- Esquema de manómetro en U.**

Fuente: Mott, Robert. Mecánica de fluidos.

### 3.1.4. Manómetro diferencial.

Este manómetro es llamado diferencial debido a que mide la diferencia de presión existente en dos puntos. No mide el valor real de la presión, si no, el incremento de presión que hay de un punto a otro. Su principio de funcionamiento es prácticamente el mismo que el del manómetro en U, a diferencia de que en el manómetro diferencial, los extremos están conectados a un punto donde se requiera tomar la medición, como se puede apreciar en la figura 3.5.

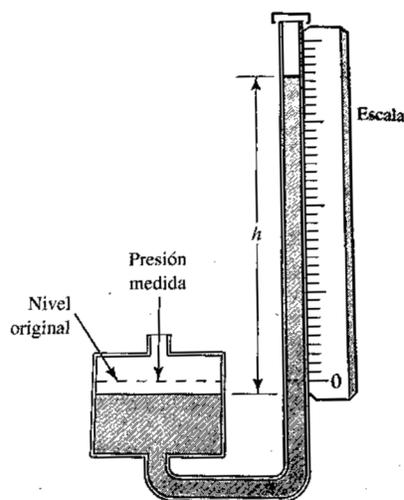


**Figura 3.5.- Diagrama de un manómetro diferencial.**

Fuente: M.White, Frank. Fluids Mechanics.

### 3.1.5. Manómetro tipo pozo.

Cuando se aplica una presión sobre este instrumento, el nivel del líquido manométrico en el pozo disminuye, caso contrario en la columna del líquido, donde este sube en proporción a la razón de las áreas del pozo y del tubo. Paralela a la columna se encuentra ubicada una escala que determinara el incremento de altura del líquido. Un diagrama de un manómetro tipo pozo se puede apreciar en la figura 3.6.

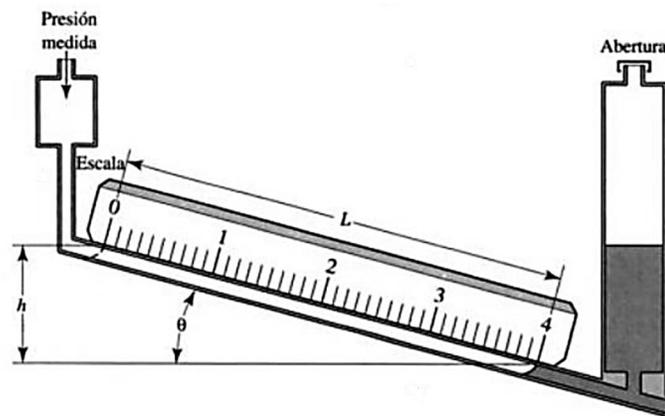


**Figura 3.6.- Diagrama de un manómetro tipo pozo.**

Fuente: Mott, Robert. Mecánica de fluidos.

### 3.1.6. Manómetro tipo pozo inclinado.

El manómetro tipo pozo inclinado, en cuanto al principio de funcionamiento, es igual al manómetro tipo pozo convencional, lo que lo distingue básicamente es la posición de la escala, la cual se encuentra posicionada con ciertos grados de inclinación, tal y como se aprecia en la figura 3.7. Esta particularidad le ofrece una sensibilidad de la variación de presión e incrementa la longitud de la escala en función del ángulo de inclinación.



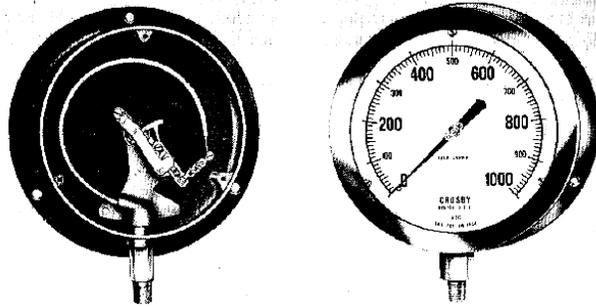
**Figura 3.7.- Diagrama de un manómetro tipo pozo inclinado.**

Fuente: Mott, Robert. Mecánica de fluidos.

### 3.1.7. Manómetro de Bourdon.

Este instrumento de medición es de los más utilizados en instalaciones industriales. El componente principal es un tubo metálico hueco, curvo y plano cerrado en un extremo, al otro extremo se conecta la presión a medir, como el manómetro de la figura 3.8. Cuando la presión al interior del tubo aumenta, este tiende a enderezarse accionando una articulación, la cual, está interconectada con una aguja indicadora causando su movimiento. En la parte frontal del manómetro se encuentra localizada la caratula. Este tipo de manómetros están calibrados normalmente a la presión atmosférica local. De acuerdo a su constitución, este tipo de manómetros sirven para medir la presión relativa. La caratula puede graduarse con cualquier tipo de unidades, las más comunes son pascales, libras por pulgada cuadrada, libras por pie cuadrado, kilogramo por centímetro

cuadrado, kilogramo por metro cuadrado, pulgadas de mercurio, pies de agua, centímetros de mercurio, y milímetros de mercurio.



**Figura 3.8.- Manómetro de Bourdon.**

Fuente: Streeter, Victor y Wylie, E. Benjamin. Mecánica de los fluidos.

### 3.2. TERMOMETROS.

La temperatura es una propiedad muy importante en termodinámica, y su valor puede obtenerse de manera relativamente fácil por medida indirecta con instrumentos calibrados. La temperatura de un sistema se determina poniendo en contacto con un segundo cuerpo, llamado termómetro y logrando el equilibrio térmico entre el sistema y el cuerpo. El valor de la temperatura se obtiene midiendo alguna propiedad del termómetro dependiente de la temperatura. Cualquier propiedad de este tipo recibe el nombre de *propiedad termométrica*. Las propiedades de los materiales empleados en los dispositivos de medida de temperatura que se utilizan comúnmente son:

1. Volumen de gases, líquidos y sólidos.
2. Presión de gases a volumen constante.
3. Resistencia eléctrica de sólidos.
4. Fuerza electromotriz de dos sólidos distintos.
5. Intensidad de radiación (a temperaturas altas).
6. Efectos magnéticos (a temperaturas extremadamente bajas).

Un termómetro es un instrumento destinado a medir temperatura mediante el cambio de una magnitud directamente relacionada con la temperatura. Existen dos tipos de termómetros:

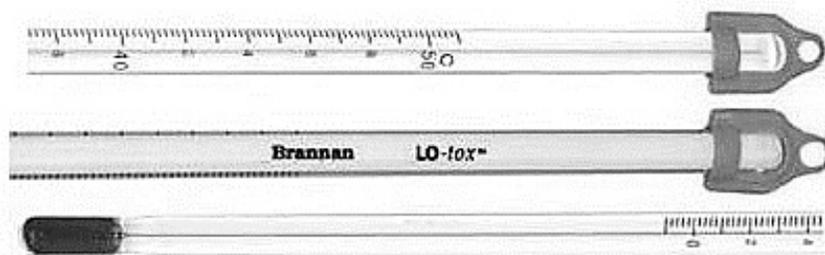
- Termómetros de dilatación.
- Termómetros de resistencia.

Los termómetros de dilatación operan por el aumento de volumen que siempre acompaña al aumento de temperatura.

Los termómetros de resistencia operan midiendo la variación de resistencia eléctrica que produce la variación de temperatura.

### 3.2.1. Termómetro de mercurio.

El termómetro de mercurio está constituido por un tubo de vidrio sellado, en su interior contiene mercurio. Este tubo debe estar en contacto directo con la superficie de la que se requiere determinar su temperatura. Con el incremento de temperatura en la superficie del termómetro, el volumen del mercurio cambia. Dicho cambio de volumen determina un incremento de temperatura en la escala graduada previamente calibrada. En la figura 3.9 se puede observar un termómetro de mercurio.



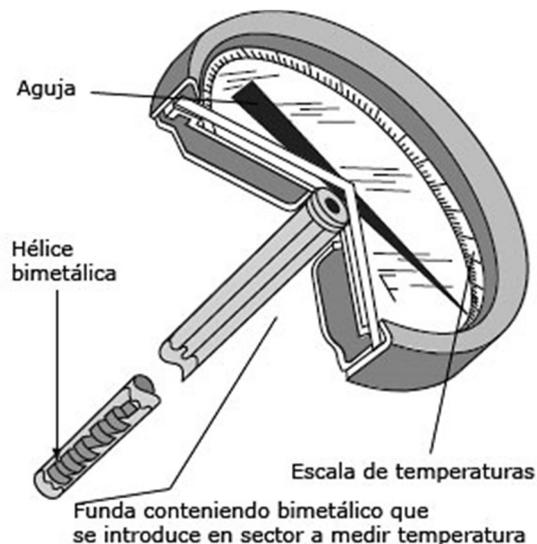
**Figura 3.9.- Termómetros de mercurio.**

Fuente: <http://www.brannan.co.uk>

### 3.2.2. Termómetro bimetalico.

Este tipo de termómetros constan de una cinta compuesta por dos láminas de metal de diferentes coeficientes de dilatación térmica, de ahí el nombre de bimetálico, unidas entre sí en forma inseparable, se deforma a consecuencia de un cambio de temperatura. La curvatura resultante de las diferentes expansiones de las láminas es casi proporcional al cambio de temperatura.

Mediante deformación mecánica de las cintas bimetalicas en las formas de muelle, frente a un cambio de temperatura se produce un movimiento de rotación. Si un extremo del sistema de banda bimetalica está sujeto en forma firme, el otro extremo hace girar el árbol porta índice. Este tipo de termómetros pueden medir temperaturas del rango de -70 a 600 °C con precisiones que van de 1 a 2 °C. En la figura 3.10 se puede apreciar un esquema de un termómetro bimetalico.



**Figura 3.10.- Esquema de un termómetro bimetalico.**

Fuente: <http://www.sapiensman.com/>

### 3.2.3. Termómetro de dilatación de gas.

El sistema de medición está compuesto de bulbo, capilar y tubo elástico en la caja. Estos componentes forman una unidad. El sistema de medida completo está relleno a presión con gas inerte. Si cambia la temperatura, cambia también la presión interior del bulbo. La presión deforma el muelle de medición, cuyo movimiento se transmite al indicador a través de un mecanismo de indicación. Las variaciones de la temperatura ambiente son despreciables porque hay un elemento bimetalico entre el mecanismo de indicación y el muelle que sirve de compensador. El rango de visualización va de -200 a +700 °C. En la figura 3.11 se aprecia un termómetro de dilatación de gas distribuido por la empresa Wika.



**Figura 3.11.- Termómetro de dilatación de gas.**

Fuente: <http://www.wika.com.mx>

### 3.3. TERMOPAR.

El termopar es un dispositivo de uso común para medir grandes diferencias de temperatura, o altas temperaturas. Se fabrican con dos conductores eléctricos (termopar) distintos, soldados entre sí en un punto de conexión. Cuando cambia la temperatura de la unión, se crea una fuerza electromotriz (FEM) en la unión, y ese voltaje se puede medir

con un voltímetro. Algunas combinaciones de alambre de termopar de uso más común son: cobre-constantán (aleación de cobre-níquel) designado como termopar tipo T, hierro-constantán, designado tipo J y cromel (aleación cromo-níquel)-alumel (aleación níquel, aluminio, manganeso y silicio), designado tipo K.

Estudios realizados sobre el comportamiento de termopares han permitido establecer tres leyes fundamentales:

1. **Ley del circuito homogéneo.** En un conductor metálico homogéneo no puede generarse la circulación de una corriente eléctrica por la aplicación exclusiva de calor. Es decir, para la formación de un termopar, se requiere de dos elementos metálicos de diferente composición.
2. **Ley de los metales intermedios.** Si en un circuito de varios conductores la temperatura es uniforme desde un punto de soldadura 'A' a otro 'B', la suma algebraica de todas las fuerzas electromotrices es totalmente independiente de los conductores metálicos intermedios y es la misma que si se pusieran en contacto directo 'A' y 'B'. En otras palabras, es posible añadir un conductor al termopar con el fin de extender el circuito, siempre y cuando ambas partes se encuentren a la misma temperatura y tengan la misma longitud entre sí.
3. **Ley de las temperaturas sucesivas.** La FEM generada por un termopar con sus uniones a las temperaturas T1 y T3 es la suma algebraica de la FEM del termopar con sus uniones a T1 y T2 y de la FEM del mismo termopar con sus uniones a las temperaturas T2 y T3.

Según la American National Standards Institute ANSI por sus siglas en inglés, establece alguna serie de características según el tipo de termopar que se desee utilizar, en la tabla 3.1 se muestra el código de colores establecido por la ANSI para algunos de los termopares utilizados comúnmente.

**Tabla 3.1.-Codigo de colores para algunos termopares según la ANSI.**

TIPO	MATERIAL		CÓDIGO DE COLOR		ENCAPUCHADO		RANGO °C	
	POSITIVO	NEGATIVO	POSITIVO	NEGATIVO	TERMOPAR	EXTENSIÓN	MÍNIMO	MÁXIMO
J	Hierro	Constantán	Blanco	Rojo	Café	Negro	0	750
K	Cromel	Alumel	Amarillo	Rojo	Café	Amarillo	-200	1250
T	Cobre	Constantán	Azul	Rojo	Café	Azul	-200	350
E	Cromel	Constantán	Morado	Rojo	Café	Morado	-200	900

Fuente: <http://www.ni.com/>

### 3.4. ANALIZADOR DE GASES.

La medición de gases es una operación compleja, más si es comparada con la medición de variables tales como voltaje, temperatura o humedad.

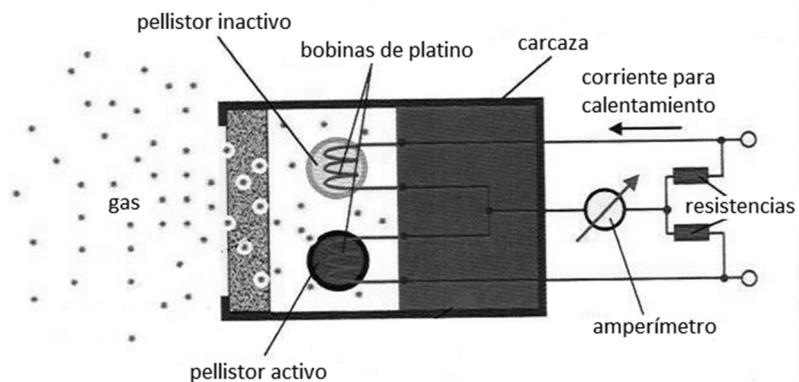
Hay gran variedad de gases y una amplia gama de aplicaciones de estos en procesos industriales. Para poder tener control de un proceso que involucra la presencia de gases, es necesario tener herramientas que permitan determinar con que clases de gas o gases se está trabajando y, en caso de ser una mezcla de gases, establecer la proporción de cada gas que compone dicha mezcla.

En la actualidad contamos con tecnología diseñada para realizar análisis de gases para cada aplicación. Existe una amplia gama de sensores en el mercado y, es muy importante hacer una selección adecuada de este, dependiendo de la necesidad que se quiere cubrir. La mayoría de sensores tienen gran sensibilidad y no se enfocan a un solo gas, sino que, son sensibles a un grupo o familia de gases. Para seleccionar un sensor que cumpla con las necesidades requeridas, es importante conocer sus características y forma de trabajo.

#### 3.4.1. Sensores catalíticos.

El sensor catalítico está compuesto por un alambre de platino en espiral recubierto con un óxido metálico tratado catalíticamente.

El principio de la medición catalítica es altamente apropiado para la detección de gases combustibles y vapores. Dos cuentas de cerámica (también llamadas “pellistor”) con bobinas de hilo de platino recubiertas de un óxido de metal, son calentadas, un “pellistor” es activado por un material catalítico el cual al alcanzar cierta temperatura oxida el gas y así forma calor adicional que puede ser detectado y medido por la resistencia del hilo de platino. Haciendo un puente con un segundo “pellistor” desactivado, como referencia, la corriente del puente es aproximadamente proporcional a la concentración de gas. En la figura 3.12 se muestra el principio de funcionamiento de un sensor catalítico.



**Figura 3.12.- Principio de funcionamiento de un sensor catalítico.**

Fuente: <http://hermandaddebomberos.ning.com/>

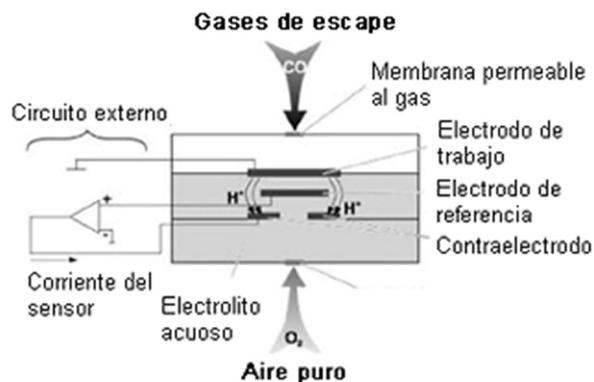
Este sensor es el más utilizado para la detección de gases de combustión, sus principales características son:

- Puede ser utilizado en dispositivos portátiles o estacionarios para detección de gases hidrocarburos.
- Dependiendo del fabricante y de su aplicación, tienen un promedio de vida de 1 a 2 años.
- Es posible medir diversos gases alterando el factor de corrección.

Por lo general, el proveedor establece el factor de corrección para cada tipo de gas que es posible medir.

### 3.4.2. Sensores electroquímicos.

El sensor electroquímico se compone básicamente de un electrodo sensor (cátodo) y contraelectrodo (ánodo) separados por un electrolito, como se ve en el esquema de la figura 3.13. El gas que hace contacto con el sensor reacciona químicamente con la superficie del electrodo sensor, generando una oxidación o reducción. La composición del electrodo sensor está diseñada especialmente para un gas en específico, los cuales catalizan las reacciones que generan una corriente eléctrica proporcional a la concentración de este gas, la cual puede ser medida para determinar la cantidad de gas contenida en la muestra de estudio.



**Figura 3.13.- Esquema de un sensor electroquímico.**

Fuente: <http://www.academiatesto.com.ar>

La precisión y características de un sensor electroquímico dependerá del gas a analizar y del fabricante, cada tipo de sensor es diferente.

Las principales características del sensor electroquímico son:

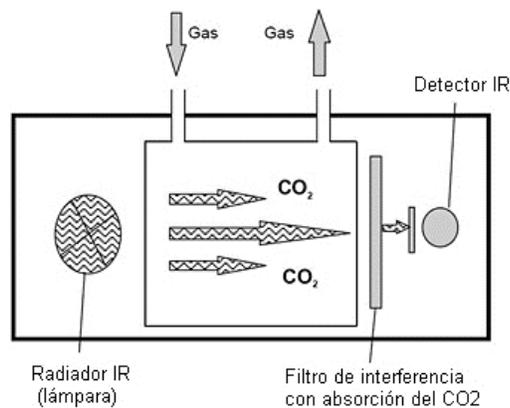
- Bajo consumo de energía de operación.
- Buena sensibilidad.
- Amplia gama de gases que puede analizar.

En términos generales, el sensor electroquímico es muy usado en instrumentos portátiles en aplicaciones de bajas concentraciones.

### 3.4.3. Sensores Infrarrojos.

Los sensores infrarrojos son útiles cuando se desea analizar gases que su composición molecular contiene de dos a más átomos diferentes entre sí. Estos átomos absorben la radiación infrarroja en largos de onda específica, la energía absorbida genera un gradiente de temperatura en las moléculas, el cual se puede relacionar con la concentración de gas. Hay dos métodos de medición mediante infrarrojo: en el método dispersivo la radiación se descompone espectralmente mediante prismas o redes de difracción antes de que el volumen de gas pase a través, después de lo cual solamente la radiación con la longitud de onda típica del componente que se está midiendo y es de interés, atraviesa el volumen del gas (cámara de medición). Este principio se usa en particular en los dispositivos de laboratorio.

En el método no dispersivo, método NDIR (Non Dispersive Infrared detector) por sus siglas en inglés, se prescinde de la descomposición espectral descrita anteriormente, y una radiación de banda ancha, modulada en todo el recorrido, pasa a través de la cámara de medición. En la figura 3.14 se muestra el esquema de un sensor infrarrojo para la medición de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).



**Figura 3.14.- Esquema de un sensor infrarrojo para  $\text{CO}_2$ .**

Fuente: <http://www.academiatesto.com.ar/>

Sus principales características son:

- No requiere contacto físico.
- Al no estar expuestos directamente al gas no se saturan ni se alteran como consecuencia de una larga exposición al gas.
- Pueden medir una alta concentración de hidrocarburos.
- Velocidad de respuesta alta.

# **CAPÍTULO 4**

## **MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS BIODIGESTORES**

## **4.1. PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO (PRFV).**

El plásticos reforzado con fibra de vidrio (PRFV) o comúnmente conocidos como fibra de vidrio, es un material compuesto, ya que está formado por dos componentes que combinan sus propiedades para dar un material, cuyas propiedades son mucho mejores a las que se tendrían si se utilizaran por separado.

El PRFV está constituido, por una estructura de fibra de vidrio y un material plástico que actúa como aglomerante de las mismas. El refuerzo de fibra de vidrio, provee al compuesto: resistencia mecánica, estabilidad dimensional, y resistencia al calor. La resina plástica aporta: resistencia química dieléctrica y comportamiento a la intemperie. Los PRFV poseen unas excelentes propiedades físicas y químicas, ya que a pesar de ser flexibles, poseen una buena resistencia mecánica y además resultan inertes a varios compuestos químicos, dependiendo de los materiales utilizados para su fabricación.

### **4.1.1. Fibra De Vidrio.**

La fibra de vidrio es un material que está compuesto principalmente de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), o mejor conocido como sílice, que es la forma más pura en la que se puede encontrar como polímero, el sílice puede ser extruido para formar filamentos o hebras de un diámetro reducido, para posteriormente ser tejidas y formar una especie de tela. Existen diferentes tipos de fibra de vidrio según su composición química y según la densidad de hilos presente en el entramado.

Uno de los mayores usos que se le da a la fibra de vidrio es el de aislante térmico dado su baja conductividad térmica que puede ir en el orden de 0.03-0.07 [ $\text{W}/(\text{m}^\circ\text{K})$ ]. La fibra de vidrio por sí sola no ofrece prácticamente resistencia mecánica alguna, pero al adicionarle otros compuestos como resinas sintéticas, se puede obtener un producto con buenas propiedades mecánicas.

Comercialmente la fibra puede encontrarse en diferentes presentaciones dentro de las cuales encontramos:

Manta de Fibra de Vidrio (MAT): Se compone de fibras de vidrio cortadas y unidas entre sí, mediante un aglutinante en emulsión o polvo de poliéster. Es un material fácil de moldear y de bajo costo lo que lo hace ampliamente utilizado para el laminado de plásticos reforzados con fibra de vidrio (PRFV).

Roving: Se obtiene al formar una hebra de hilos continuos de filamentos de fibra de vidrio con cierta torsión mecánica. Se utiliza principalmente en la industria para la producción de piezas solidas o huecas de sección constante en proceso conocido como pultrusión.

Tejidos roving: Son telas de alto rendimiento, formada por el tejido de hilos roving, que otorga una excelente resistencia mecánica en el laminado de plásticos reforzados con fibra de vidrio, dada la alta densidad de hilos de fibra de vidrio.

#### **4.1.2. Resinas.**

Las resinas son sustancias sintéticas que pueden clasificarse en termoplásticas y termofijas. Las resinas termoplásticas pueden encontrarse en estado sólido a temperatura ambiente y son tratadas mediante calentamiento para alcanzar su punto de fusión y ser procesadas por inyección, extrusión o soplado. Suelen fabricarse en altos volúmenes dado su difícil procesamiento y costosos componentes. Estas resinas pueden ser utilizadas más de una vez, por lo tanto, son reciclables, al contrario de las termofijas que una vez curado el producto ya no puede volver a ser utilizado.

Algunas resinas termofijas tienen algunos inconvenientes como los altos costos de producción que se presentan al trabajar con materiales termoplásticos, algunos de las resinas que son la excepción son los utilizados en el laminado de PRFV, entre las que encontramos resinas de poliéster y de más reciente fabricación las resinas viniléster. Estas resinas presenta la ventaja de encontrarse en estado líquido y son procesadas al agregarles catalizadores y acelerantes que las transforman en estado sólido a temperatura ambiente. La transformación de estas resinas a estado sólido se le conoce como polimerización o curado. Esta reacción no ocurre instantáneamente después de la adición de los promotores de curado. Además, estas resinas, permanecen inalteradas durante algunos minutos (5, 10, 15 o más minutos, dependiendo de las cantidades de catalizador, acelerador y de las condiciones ambientales), luego pasan por una etapa gelatinosa antes de endurecer. Para el caso específico de poliésteres y vinilésteres, el tiempo transcurrido entre la adición de los agentes promotores de polimerización y el inicio de la gelatinización es conocido como tiempo de gel. Una vez ocurrida la gelatinización el curado prosigue con gran desprendimiento de calor (reacción exotérmica) hasta que la resina presenta, después del enfriamiento, las características físicas de un sólido rígido que ya no puede ser transformado en líquido. La reacción de curado de los poliésteres es irreversible, esto es, una vez transformados de líquidos a sólidos, ya no pueden ser reprocesados de sólidos en líquidos. Las fibras de vidrio son incorporadas a la resina, mientras que la resina permanece líquida, inmediatamente después de la adición del catalizador y el acelerador para así formar un PRFV. Cabe mencionar que además de la inclusión de catalizadores y aceleradores para el proceso de curado se pueden adicionar aditivos para mejorar las propiedades de la resina como los aditivos que modifican su viscosidad para facilitar su aplicación al utilizar sistemas de aspersion o aditivos que mejoran la vida útil al ser sometidas a la acción de los rayos ultravioleta.

#### **4.1.2.1. Resinas De Poliéster.**

Las resinas de poliéster están formadas por una mezcla homogénea de una cadena polimérica central, en base a poliéster, que se encuentra disuelta en monómero estireno, el cual además de ser usado como diluyente de la resina cumple una función estructural dentro del curado de la resina. Otro componente de la resina es un inhibidor que permite que la resina no reaccione espontáneamente, es decir, no gele antes de agregar los promotores de la reacción.

La cadena polimérica en base a poliéster es la unidad fundamental de la resina, y dependiendo de los monómeros que componen dicha cadena, van a ser las características propias que la resina pueda tener. Dicha cadena está formada por distintos tipos de glicoles, ácidos saturado y ácidos insaturados.

Dentro de las principales resinas de poliéster utilizadas para el trabajo del PRFV podemos encontrar las resinas ortoftálicas y las resinas isoftálicas.

##### **4.1.2.1.1. Resinas ortoftálicas.**

Las resinas ortoftálicas, son resinas de uso general y las más simples en su formulación, por lo tanto las más económicas de todas. En las resinas ortoftálicas podemos encontrar las siguientes propiedades:

- Baja viscosidad.
- Excelente resistencia mecánica.
- Buena impregnación de la fibra de vidrio.
- Pueden trabajar bajo todo tipo de cargas.
- Fácil desmolde.
- Adecuado tiempo de gel.

#### **4.1.2.1.2. Resinas Isoftálicas.**

Las resinas isoftálicas, son resinas de alta reactividad, son resistentes a compuestos químicos y al calor (moderado). Además de contar con las mismas propiedades que las resinas ortoftálicas se les agrega:

- Buena resistencia química.
- Baja absorción de agua.

Estas propiedades las hacen excelentes para la fabricación de moldes, herramientas y gelcoats

#### **4.1.2.2. Resinas Viniléster.**

Las resinas viniléster son así llamadas por tener en las extremidades de sus moléculas grupos vinílicos. Las resinas viniléster no pertenecen a la familia de los poliésteres, aunque son transformadas como éstas. Mientras que los poliésteres son sintetizados a partir de bi-ácidos y glicoles, las resinas viniléster son obtenidas por la modificación de epoxies con ácidos vinílicos. Los laminados obtenidos con estos materiales, poseen excelente resistencia química a ácidos y bases, así como una buena resistencia mecánica. El principal campo de aplicación de estos materiales es en la fabricación de cañerías y depósitos para el manejo de sustancias altamente corrosivas.

#### **4.1.2.3. Gel-Coat.**

Los gel-coats, son resinas termofijas que constituyen la superficie de los PRFV y cuyas principales funciones son las de proteger la pieza de los efectos de la intemperie, dar un acabado liso a la pieza y servir de base para la aplicación de pinturas.

Al ser los gel-coats resinas termofijas, podemos distinguir diferentes tipos de gelcoat, como los gelcoat ortoftálicos, isoftálicos y los viniléster. Cuyas propiedades son iguales a las mencionadas previamente.

#### **4.1.3. Acelerantes y Catalizadores.**

Para poder comenzar el proceso de polimerización o curado en alguna resina de poliéster o vinilester es necesario adicionarles catalizadores o acelerantes. Los catalizadores utilizados para las resinas de poliéster y viniléster, son generalmente, peróxidos orgánicos que son inestables químicamente y susceptibles a descomponerse violentamente, por esta razón, suelen suministrarse en forma de dispersión ya sea en pasta, líquido o en forma de polvo.

Los catalizadores más utilizados para el PRFV son el peróxido de benzolio, que puede ser adquirido sin disolución al 100% o diluido en dibutil ftalato; y el peróxido de metil etil cetona (PMEC) que es vendido en disolución al 50% con dimetil ftalato. Suelen utilizarse en una proporción del 2% de la cantidad de resina utilizada, aunque puede variar dependiendo las condiciones ambientales, ya que en ambientes muy secos y de calor excesivo puede emplearse incluso un 1.5%, en cambio, para ambientes fríos o muy húmedos puede llegar a emplearse 3% a 4% de la totalidad de resina utilizada. Es recomendable realizar un mezclado apropiado de la resina con el catalizador, con el fin de obtener un curado uniforme de la pieza, de lo contrario, se podrían tener lugares que han endurecido por completo y zonas que apenas comienzan con el denominado tiempo de gel.

Los aceleradores sirven, como su nombre lo indica, para acelerar el proceso de curado de la resina sin la necesidad de calor, muchos compuestos químicos pueden servir como aceleradores, los más importantes y los más utilizados en el proceso de fabricación de PRFV son los basados en sales de cobalto. La gran cantidad de resinas ofrecidas en el

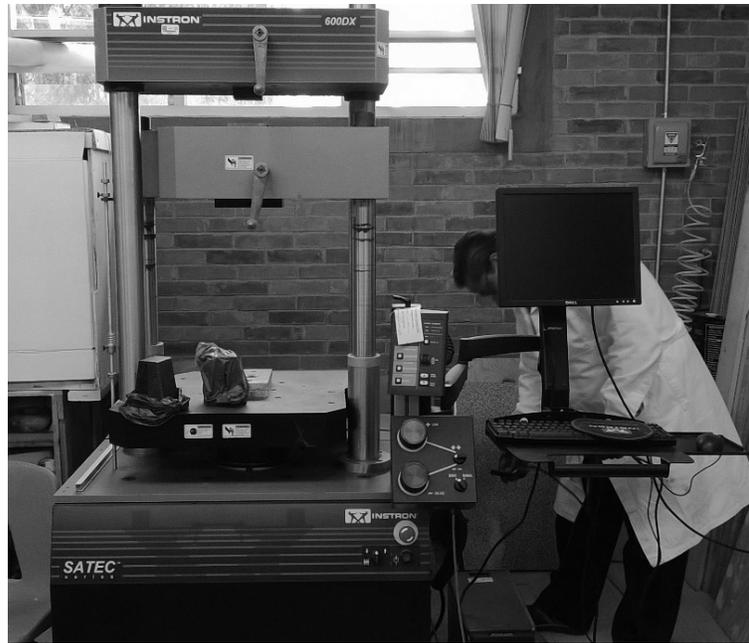
mercado vienen preaceleradas por lo que solamente es necesario adicionarles el catalizador para poder realizar el curado de la resina.

#### **4.2. PRUEBA DE TENSIÓN AL PRFV.**

La resistencia de un material está en función de su capacidad de soportar una carga sin presentar una deformación excesiva o falla. Esta resistencia es propia de cada material y sólo se determina mediante experimentación. Uno de estos experimentos es la prueba de tensión o compresión. Se utiliza principalmente para determinar la relación entre el esfuerzo normal promedio y la deformación normal unitaria de diversos materiales tales como metal, cerámica, polímeros o compuestos.

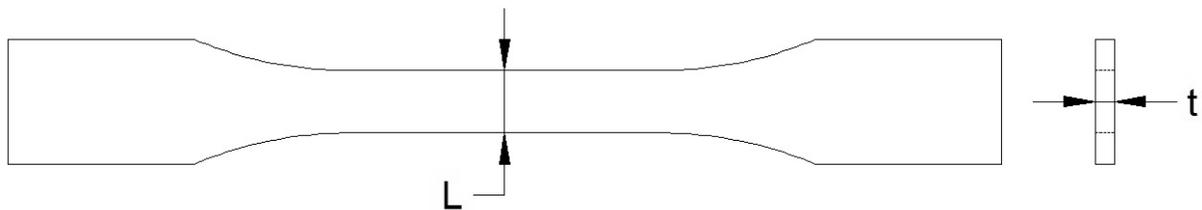
El ensayo de tensión tiene como objetivo evaluar la resistencia de un material. El procedimiento común es colocar muestras del material a utilizar y someterlas a pruebas en máquinas que apliquen cargas, para posteriormente medir las deformaciones que resulten del experimento, estos cambios hacen referencia a las dimensiones tanto en longitud como en el área transversal que presente la muestra, antes y después de la prueba.

En la figura 4.1 podemos observar la máquina de pruebas de tensión, ubicada en el centro de asimilación tecnológica (CAT) de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. En esta máquina se coloca una probeta fabricada con el material a estudiar, se sujeta por los dos extremos para que la maquina la someta a un esfuerzo a tensión controlado, mientras, la computadora se encarga de registrar, por medio de dispositivos de control y procesamiento de datos, las deformaciones que se presentan en el material de estudio.



**Figura 4.1. Máquina de tensión del CAT.**

Para la realización del ensayo de tensión se fabricaron tres probetas, las cuales tenían forma como la que se muestra en la figura 4.2.



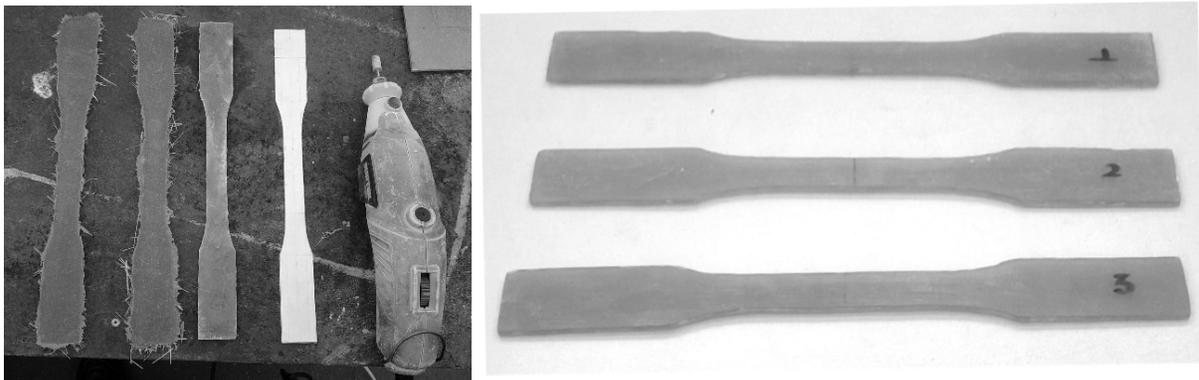
**Figura 4.2. Forma de las probetas de PRFV.**

Las probetas se construyeron empleando como base un pedazo de MDF, al cual se le aplicaron dos capas de cera desmoldante para impedir que las probetas se adherirán al MDF y sobre de este se colocaron tres capas de resina ortoftálica y fibra de vidrio, como se observa en la figura 4.3.



**Figura 4.3.- Fabricación de las probetas para el ensayo de tensión.**

Una vez aplicada las capas necesarias de fibra de vidrio y resina se procedió al desmolde de las probetas y posteriormente mediante un moto tool, como se ve en la figura 4.4 se les dio el acabado final a las piezas, para poder ser medidas y colocadas en la máquina de tensión.



**Figura 4.4.- Acabado de las probetas de PRFV.**

Antes de someter las probetas al ensayo de tensión, con un vernier se midió el espesor ( $t$ ) y el ancho ( $L$ ) en la parte más angosta de cada probeta, y se calculó su respectiva área, multiplicando el espesor por el ancho, los resultados de estas mediciones se muestran en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1.- Mediadas de las tres probetas.**

<b>Pieza ensayada</b>	<b>Ancho “L” [mm]</b>	<b>Espesor “t” [mm]</b>	<b>Área [mm<sup>2</sup>]</b>
Probeta 1	15.60	4.40	68.64
Probeta 2	14.27	3.70	52.80
Probeta 3	15.20	4.47	67.94

Las probetas se colocaron en la máquina de tensión tal como se observa en la figura 4.5, los datos se registraron mediante el software del equipo. Las gráficas que fueron realizadas por el equipo fueron de posición [mm] contra carga [kg].



**Figura 4.5.- Ensayo de tensión de las probetas.**

La primer probeta fue ensayada con una velocidad de 3 kg/min, dando un ensayo de casi 3 horas de duración, se decidió que la primera probeta fuera ensayada con un incremento de carga muy lento para simular las condiciones en las que la presión incidirá sobre la fibra, para las pruebas de las probetas 2 y 3 la velocidad de ensayo aumento, dándoles una velocidad de 20 kg/min. En la figura 4.6 se puede observar las rotura de las tres probetas, nótese que lo ideal siempre es que una probeta se quiebre del centro, pero dado al proceso de fabricación del PRFV es complicado que las dimensiones de las probetas sean exactamente iguales en toda la superficie de la pieza, por lo tanto al aplicárseles carga, las probetas quebraron en su zona más frágil.



**Figura 4.6.-Rotura de las probetas 1, 2 y 3 de izquierda a derecha.**

Los resultados otorgados por el equipo se pueden apreciar en el anexo A1 al final del documento. Para el cálculo del esfuerzo máximo que soportaron las muestras necesitamos definir el concepto de esfuerzo y como se calcula.

El esfuerzo se define como la fuerza que actúa sobre un área, lo cual, queda definido en la ecuación 4.1:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{(Ecuación 4.1)}$$

Donde:

$\sigma \rightarrow$  Esfuerzo  $\left[ \frac{kg_f}{cm^2}, \frac{N}{m^2}, \frac{lb_f}{ft^2}, \frac{lb_f}{in^2}, etc \right]$

$F \rightarrow$  Fuerza

$A \rightarrow$  Área

Dado que las probetas 1, 2 y 3 soportaron una carga a la tensión de 527, 490 y 601 Kg<sub>f</sub> respectivamente, podemos sustituir los valores en la ecuación 18 apoyándonos también de los valores de área expuestos en la tabla 4.1 para cada probeta.

Sustituyendo los valores para la probeta 1 en la ecuación 4.1 obtenemos:

$$\sigma_1 = \frac{F}{A} = \frac{527 \text{ kg}_f}{68.64 \text{ mm}^2} = 7.678 \frac{\text{kg}_f}{\text{mm}^2}$$

Haciendo la conversión a  $\frac{\text{kg}_f}{\text{cm}^2}$ :

$$7.6777 \frac{\text{kg}_f}{\text{mm}^2} \left[ \frac{(10\text{mm})^2}{(1\text{cm})^2} \right] = 767.77 \frac{\text{kg}_f}{\text{cm}^2}$$

Para la probeta 2 tenemos:

$$\sigma_2 = \frac{490 \text{ kg}_f}{53.799 \text{ mm}^2} \left[ \frac{100 \text{ mm}^2}{1 \text{ cm}^2} \right] = 910.80 \frac{\text{kg}_f}{\text{cm}^2}$$

El esfuerzo que soporta la probeta 3 fue de:

$$\sigma_3 = \frac{601 \text{ kg}_f}{67.944 \text{ mm}^2} \left[ \frac{100 \text{ mm}^2}{1 \text{ cm}^2} \right] = 884.55 \frac{\text{kg}_f}{\text{cm}^2}$$

En la tabla 4.2 se muestran las cargas máximas y el esfuerzo máximo para las tres probetas ensayadas.

**Tabla 4.2.- Resultados de los ensayos de las probetas.**

Pieza ensayada	Carga máxima [kg <sub>f</sub> ]	Esfuerzo [ kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup> ]
Probeta 1	527	767.77
Probeta 2	490	910.80
Probeta 3	601	884.55

En base a estos resultados, podemos descartar el valor máximo que es el de 910.80 kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup>, al igual que el valor mínimo de 767.77 kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup>, para considerar que el plástico reforzado con fibra de vidrio, resiste un esfuerzo máximo de tensión de 884.55 kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup>.

# **CAPÍTULO 5**

## **DISEÑO**

Para la fabricación de los biodigestores, debemos de contemplar ciertos parámetros o características que debe cumplir el diseño. En base a la información de los capítulos anteriores, se pueden definir los siguientes parámetros de diseño:

- **Biodigestor tipo Batch o discontinuo**, puesto que en el lugar donde estarán instalados, no se cuenta con una fuente de materia orgánica a la mano, la opción más viable es realizar biodigestores del tipo discontinuo, que deberá constar de dos partes: el cuerpo y una tapa.
- **Sello hermético**, dado que las bacteria metanogénicas encargadas de la producción de metano, son extremadamente sensibles al oxígeno, es necesario mantener una atmosfera prácticamente carente de oxígeno dentro del biodigestor, también es importante lograr que el biogás generado por la fermentación sea almacenado dentro del cuerpo del biodigestor para su posterior extracción, el sistema planeado para lograr el sello hermético es el de crear una pestaña tanto en el cuerpo como en la tapa, para permitir la unión de ambas con tornillos a fin de emular una brida.
- **Térmicamente estables**, ya que las bacterias encargadas en el proceso de fermentación anaeróbica son delicadas a los cambios bruscos de temperatura, es necesario tener un sistema aislado.
- **Capacidad de 30 litros** para el cuerpo del biodigestor.
- Permitir la **extracción de una muestra** de la mezcla materia orgánica con agua, uno de los parámetros de estudio que tiene una gran relevancia en la fermentación anaeróbica es el pH, por lo tanto, es importante conocer sus cambios conforme avanza el proceso.
- **Medición de temperaturas**, al igual que el pH, la temperatura es otra variable que se debe de monitorear constantemente a fin de conocer su comportamiento. Para la medición se considera emplear cable termopar tipo K que presenta buenas propiedades en ambientes corrosivos, dada la composición del materia de los conductores que lo conforman.

- **Extracción de biogás**, el biogás generado por el proceso se almacena dentro del biodigestor, para su posterior análisis, por ello es necesario tener la posibilidad de extraerlo del recipiente.
- **Mecánicamente resistentes**, los biodigestores deben de soportar la carga de la mezcla, además de resistir los efectos generados por el aumento de presión dentro del recipiente, para esto, la forma que mayor resistencia ofrece son los recipientes cilíndricos.
- **Reproducibles**, para la comparación de diferentes mezclas, es necesario contar con biodigestores de las mismas características, esta es la razón por la cual los biodigestores deberán ser fabricados mediante un molde, tanto para el cuerpo como para las tapas.

Para cumplir estos parámetros, se decidió que el Plástico Reforzado con fibra de vidrio sería el material adecuado para la fabricación de los biodigestores debido a que, es un material aislante que permitirá tener una temperatura relativamente estable dentro del recipiente, es sencillo de trabajar, no tiene un costo elevado y tiene una resistencia considerable, como lo demuestra la prueba de tensión realizada a este material.

## **5.1. CUERPO DEL BIODIGESTOR.**

Para la fabricación del cuerpo del biodigestor se consideró para molde un sonotubo (o tubo de cartón), dado que los diámetros comerciales de los sonotubos son de: 10, 15, 20, 30, 35, 40 y 50 cm. Para encontrar el diámetro ideal para contener un volumen de 30 litros se determinó la altura para los diferentes diámetros, utilizando la ecuación 5.1 que determina el volumen de un recipiente cilíndrico “V”, se seleccionó el diámetro que tuviera una proporción cercana a 1:1 con la altura, para brindarle una buena estabilidad al recipiente.

$$V = \frac{h\pi d^2}{4} \quad \text{(Ecuación 5.1)}$$

Despejando “h” de la ecuación 5.1 se obtiene la ecuación 5.2:

$$h = \frac{4V}{\pi d^2} \quad \text{(Ecuación 5.2)}$$

Como se conoce el valor de “V” que es de 30 litros se puede sustituir los diámetros de 30, 35 y 40 cm para obtener la altura “h” para cada diámetro.

Sustituyendo para “d” igual a 30 cm.

$$h = \frac{4(30 \text{ lt}) \left( \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ lt}} \right)}{\pi(30 \text{ cm})^2} = 42.441 \text{ cm}$$

Para 35 cm se tiene:

$$h = \frac{4(30 \text{ lt}) \left( \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ lt}} \right)}{\pi(35 \text{ cm})^2} = \mathbf{31.181 \text{ cm}}$$

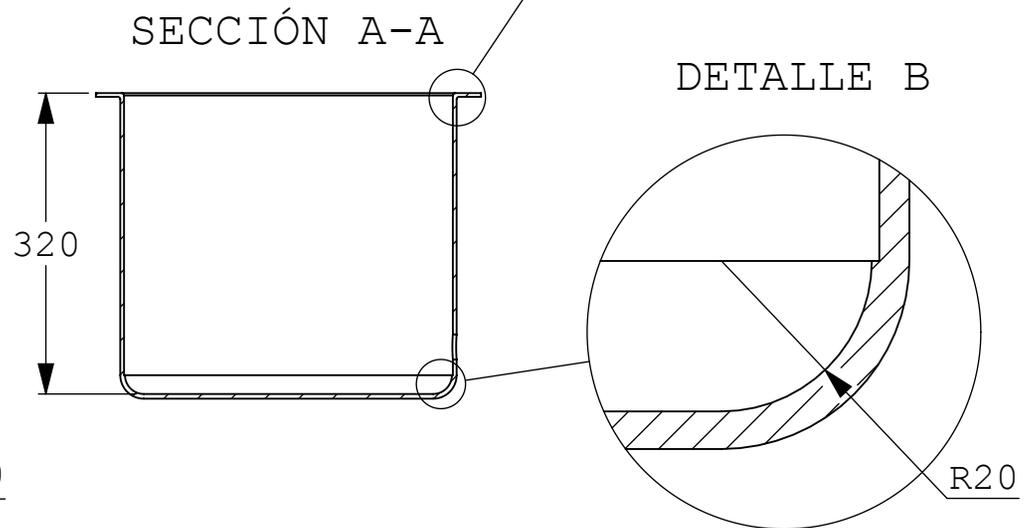
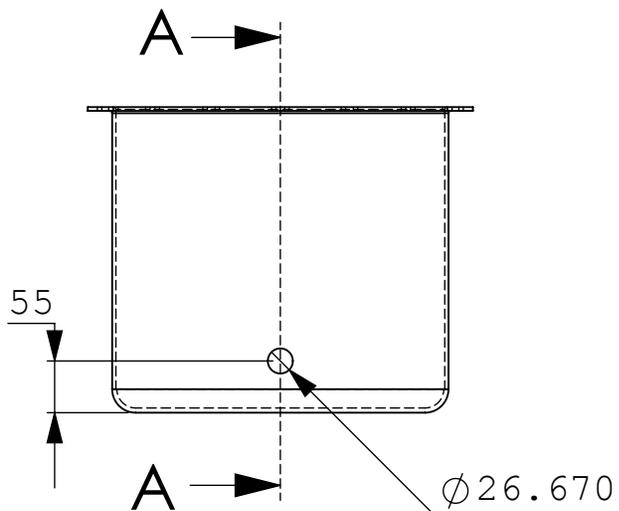
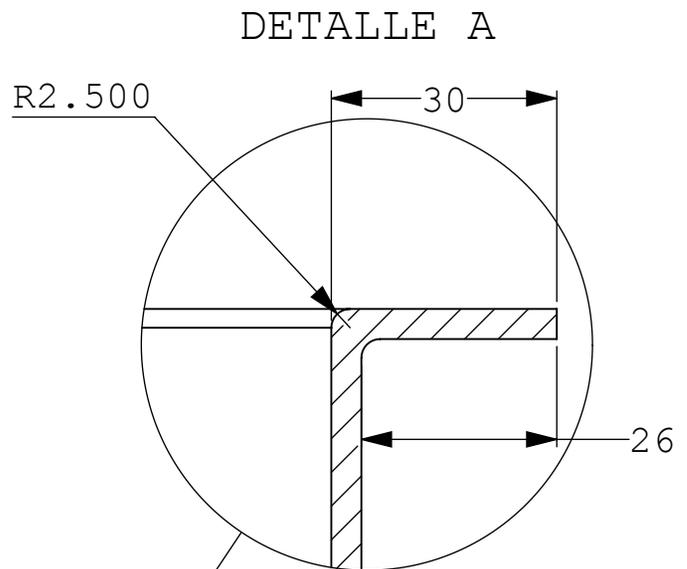
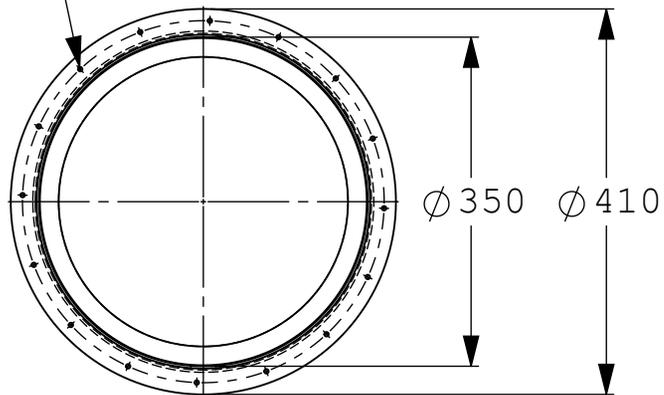
Y para “d” igual a 40 cm se obtiene:

$$h = \frac{4(30 \text{ lt}) \left( \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ lt}} \right)}{\pi(40 \text{ cm})^2} = 23.873 \text{ cm}$$

Dado estos resultados se observó que la relación de altura “h” con diámetro “d” más cercana a uno es cuando se tiene un diámetro de 35 cm, por lo tanto, se consideró este diámetro para la fabricación de los biodigestores.

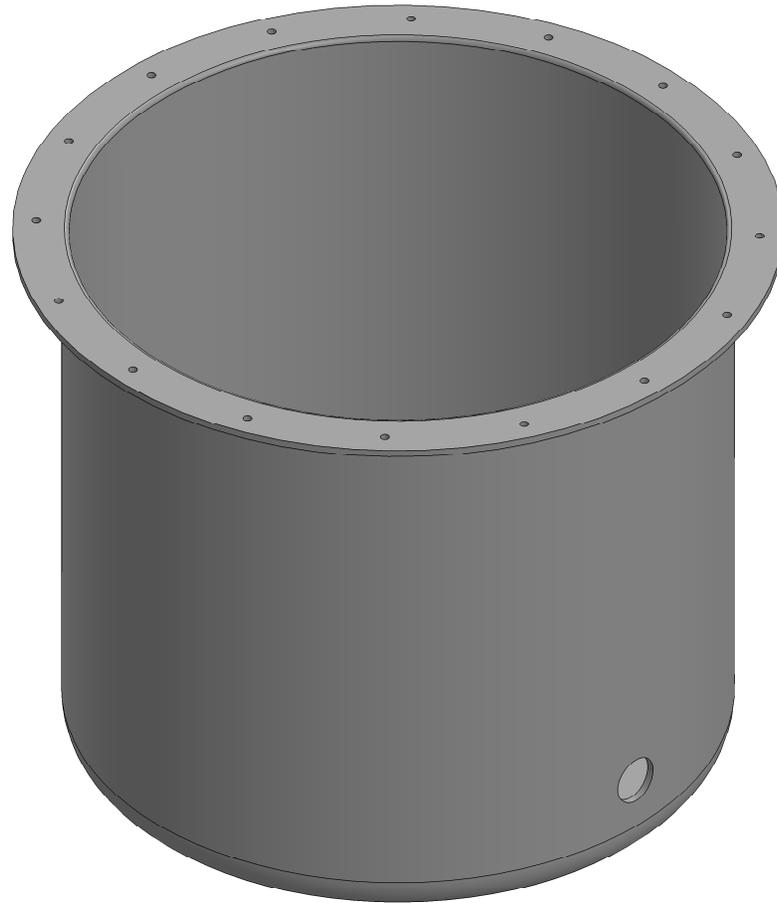
En el plano 1 y 2 de la siguientes páginas, se pueden observar el diseño del cuerpo del biodigestor así como sus dimensiones finales, destacando que tiene una altura de 32 cm, diámetro interno de 35 cm, redondeo en la parte inferior de 2 cm, 16 perforaciones para tornillos de 3/16 in en la pestaña superior, una perforación para la extracción de muestras y se consideró que tendría un espesor de 4 mm.

$\varnothing 4.763 \times 16$   
a R19.25



UNAM	JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA		ESCALA: 1:8
FES-C		CUERPO DEL BIODIGESTOR	ACOTACIÓN: mm
I.M.E.			

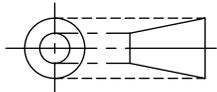
# REPRESENTACIÓN DEL CUERPO DEL BIODIGESTOR



UNAM

JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA

FES-C



SOLIDO DEL CUERPO DEL BIODIGESTOR

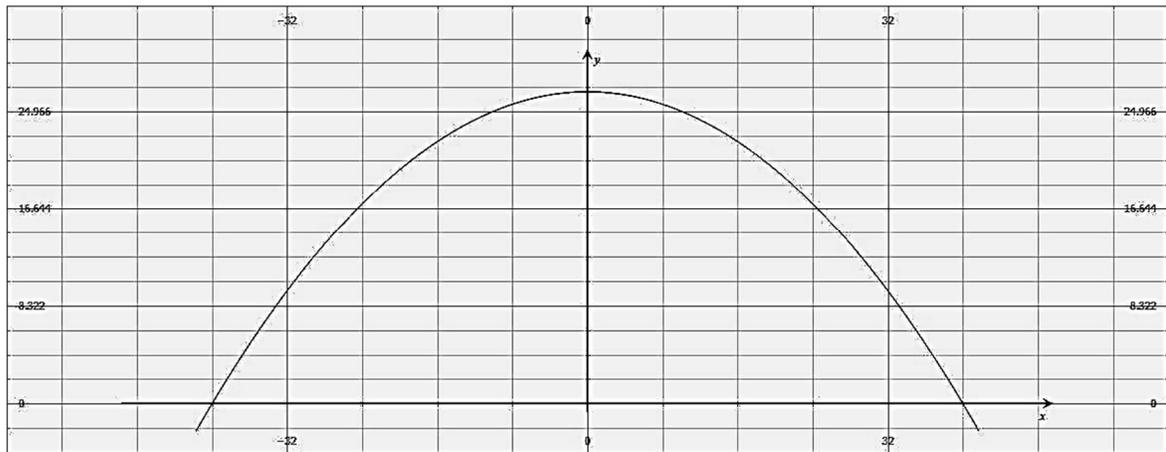
PLANO 2

I.M.E.

## 5.2. TAPA DEL BIODIGESTOR.

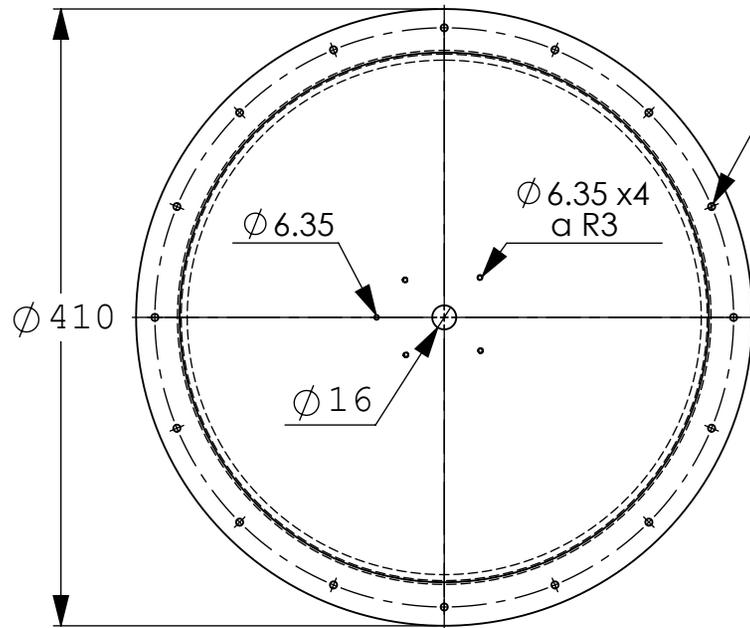
La tapa del biodigestor tiene una forma paraboloides con la finalidad de ofrecer resistencia a la presión generada por el biogás en el interior del recipiente, el molde fue fabricado de fibra de vidrio mediante un molde para parábolas, elaborado para otros proyectos en el Laboratorio de Investigación en Energías Renovables, cuya forma está definida por la ecuación 5.3, los parámetros que la definen son que el foco está a 15 cm del vértice y toca el eje “x” en los puntos de -40 y 40 cm.

$$f(x) = -\frac{x^2}{60} + \frac{80}{3} \quad (\text{Ecuación 5.3})$$



**Figura 5.1.- Grafica de la ecuación 21.**

En los planos 3 y 4 se observa el diseño de la tapa de los biodigestores. En los planos se destaca que tiene 16 perforaciones de 3/16 in para los tornillos de sujeción al igual que el cuerpo, también cuenta con 5 perforaciones de 1/8 in, 4 para la colocación de la salida de gas mediante remaches y una más para el termopar para la medición de temperaturas y por ultimo una perforación de 16 mm para las partes que constituyen la salida de gas. Al igual que el cuerpo del biodigestor, la tapa tiene un espesor de 4 mm.



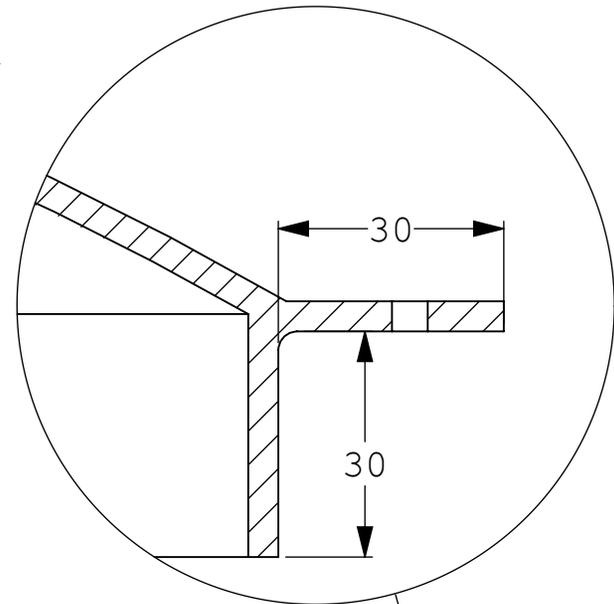
$\varnothing 4.763 \times 16$   
a R3

$\varnothing 6.35$

$\varnothing 6.35 \times 4$   
a R3

$\varnothing 16$

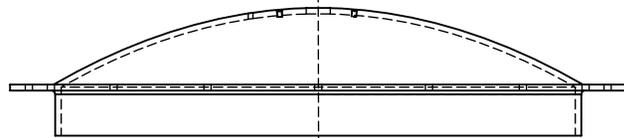
DETALLE C



30

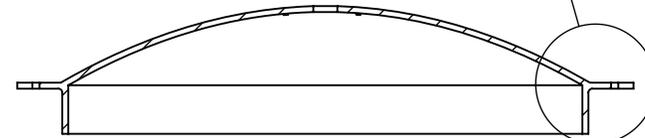
30

B →



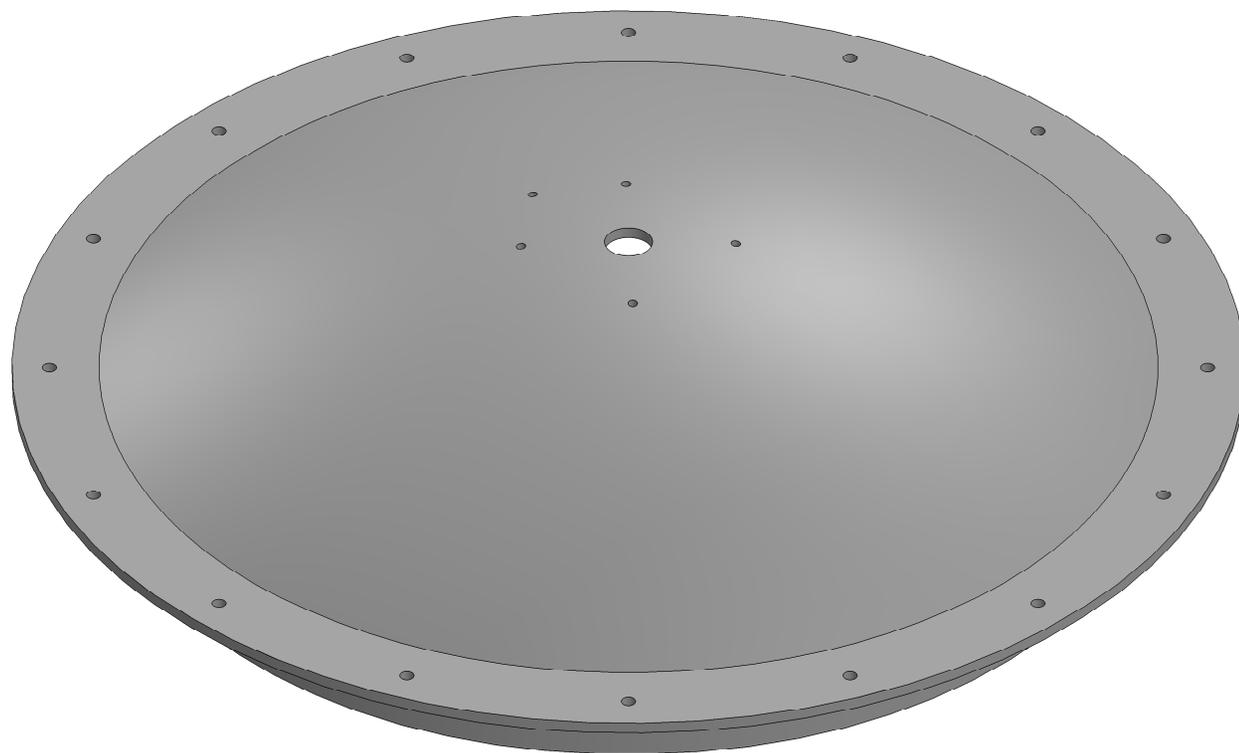
B →

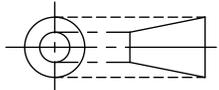
SECCIÓN B-B



UNAM	JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA		ESCALA: 1:5
FES-C		TAPA DEL BIODIGESTOR	ACOTACIÓN: mm
I.M.E.		PLANO 3	

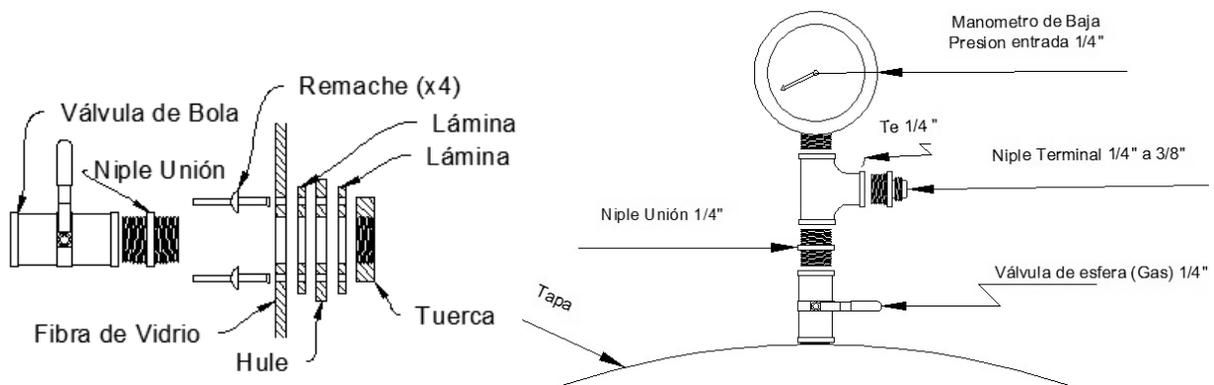
# REPRESENTACIÓN DE LA TAPA DEL BIODIGESTOR



UNAM	JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA		
FES-C		SOLIDO DE LA TAPA DEL BIODIGESTOR	PLANO 4
I.M.E.			

### 5.3. SALIDA DE GAS.

Como se ha mencionado, la salida de gas permite realizar la medición de presión del biogás así como la extracción de sustrato para su análisis, la cual se encuentra remachada a la tapa y consta de dos láminas cuadradas calibre 20 de 7 cm, un cuadro de hule de 7 cm, una reducción bushing galvanizada de  $\frac{1}{2}$  in a  $\frac{1}{4}$  in que sirve como tuerca, un niple unión de acero inoxidable de  $\frac{1}{4}$  in y una válvula esférica para gas de  $\frac{1}{4}$  in, como se aprecia a la izquierda en la figura 5.2; para la medición de presiones se cuenta con un manómetro después de la válvula de gas, aunque este no está de forma permanente. Además a la derecha en la figura 5.2 se muestra el diagrama de conexiones para la quema del biogás almacenado del recipiente, en el niple terminal de  $\frac{1}{4}$  a  $\frac{3}{8}$  in se coloca una manguera coflex de  $\frac{3}{8}$  in para gas y esta a su vez está conectada a una parrilla de gas Lp.

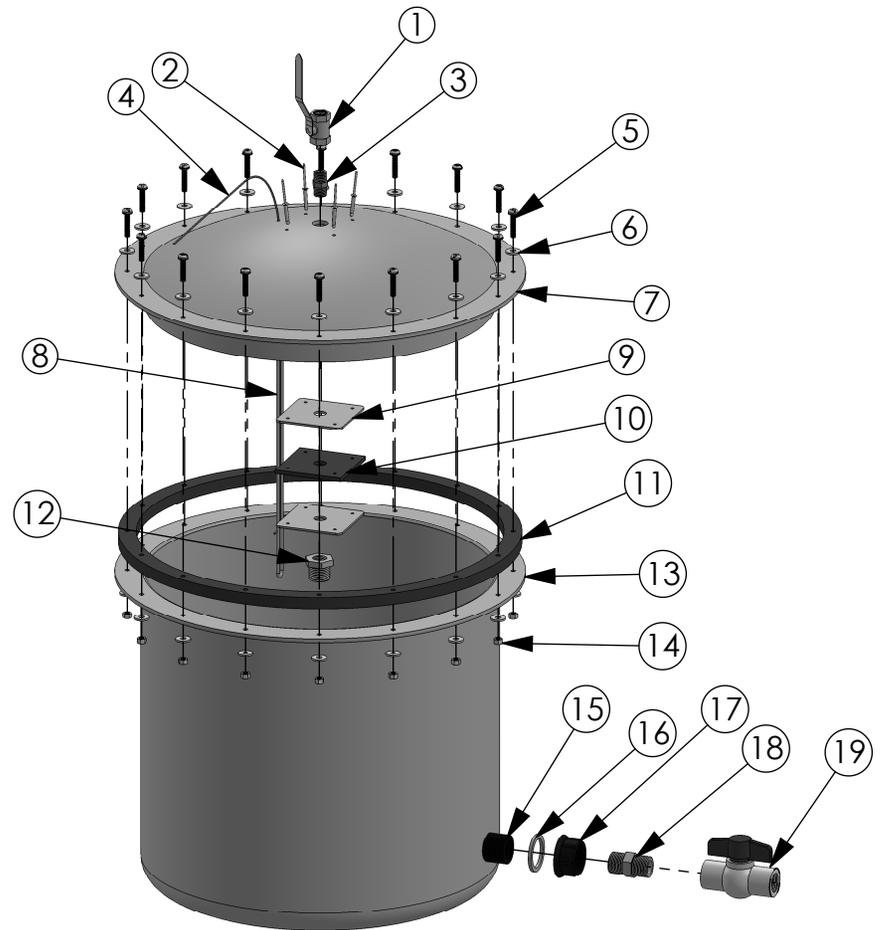


**Figura 5.2.- Dibujo de la salida de gas que será remachada en la tapa (izquierda) y dibujo de las conexiones a emplear para la quema del biogás (derecha).**

### 5.4. VISTA DE CONJUNTO.

En el plano 5 se puede apreciar la vista de conjunto de los biodigestores, en donde se enumeran los componentes que lo conforman.

No.	Descripcion
1	1 Válvula de esfera de 1/4" para gas
2	4 Remaches 1/8 X 3/4"
3	1 Niple unión 1/4"
4	1 Termopar tipo K cal. 24
5	16 Tornillos 3/16 X 1"
6	32 Rondanas 3/16"
7	1 Tapa del Biodigestor
8	1 Soporte de alambre galvanizado para el termopar
9	2 Láminas de 7 X 7 cm cal. 20
10	1 Cuadro de 7 cm de Neopreno con espesor de 1/8"
11	1 Empaque de goma de 1/2" de espesor, diámetro int de 35 cm y ext de 37 cm
12	1 Reducción bushing de 1/2 a 1/4"
13	1 Cuerpo del biodigestor
14	16 Tuercas de 3/16"
15	1 Brida para salida de tinado de 1/2"
16	2 Empaques de diámetro int 1.15" y ext 1.5"
17	1 Contratuerca para brida de 1/2"
18	1 Niple unión de 1/2"
19	1 Válvula de esfera de 1/2"



UNAM	JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA		
FES-C		ENSAMBLE DEL BIODIGESTOR	PLANO 5
I.M.E.			

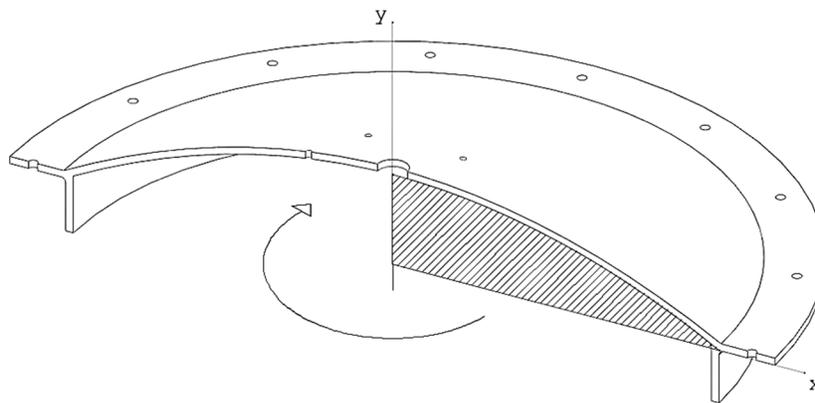
## 5.5. VOLUMEN TEÓRICO DEL BIODIGESTOR.

Con las dimensiones seleccionadas se determinó la capacidad máxima del biodigestor, realizando el cálculo del volumen para las partes que lo componen, es decir, la tapa y el cuerpo del mismo, como sigue:

### 5.5.1. Volumen de la tapa.

Para calcular el volumen de la tapa, se empleó la ecuación 5.3 del molde de parábolas modificándola para obtener la ecuación 5.4, cuya ecuación cumple con que toca el eje “x” en los valores de -17.5 y 17.5 cm, puesto que el radio de nuestra tapa es de 35 cm. Además se empleó la ecuación 5.5 que permite obtener el volumen de un área en revolución a 360° sobre el eje “y”, como se aprecia en la figura 5.3.

$$f(x) = -\frac{x^2}{60} + \frac{245}{48} \quad \text{(Ecuación 5.4)}$$



**Figura 5.3.- Detalle del área para obtener el volumen de la tapa.**

$$V_{Tapa} = 2\pi \int_a^b xf(x)dx \quad \text{(Ecuación 5.5)}$$

Sustituyendo la ecuación 5.4 en la ecuación 5.5 se tiene:

$$V_{Tapa} = 2\pi \int_a^b x \left( -\frac{x^2}{60} + \frac{245}{48} \right) dx = 2\pi \int_a^b \left( -\frac{x^3}{60} + \frac{245}{48}x \right) dx$$

Simplificando:

$$V_{Tapa} = 2\pi \left[ \int_a^b \left( -\frac{x^3}{60} \right) dx + \int_a^b \frac{245}{48} x dx \right]$$

Resolviendo las integrales:

$$V_{Tapa} = 2\pi \left[ -\frac{x^4}{240} + \frac{245x^2}{96} \right]_b^a$$

Los intervalos para resolver la integral son  $a = 0$  y  $b = 17.5$  y el resultado estará dado en  $\text{cm}^3$ .

$$V_{Tapa} = 2\pi \left[ -\frac{x^4}{240} + \frac{245x^2}{96} \right]_{0}^{17.5}$$

Sustituyendo:

$$V_{Tapa} = 2\pi \left[ \left( -\frac{(17.5)^4}{240} + \frac{245(17.5)^2}{96} \right) - \left( \frac{(0)^4}{240} + \frac{245(0)^2}{96} \right) \right]$$

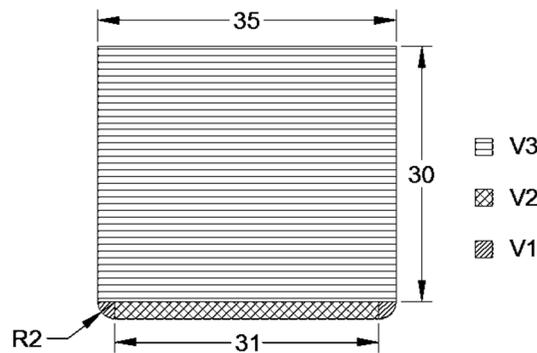
Resolviendo:

$$V_{Tapa} = 2\pi(390.7878 - 0) = 2455.392 \text{ cm}^3 \left( \frac{1 \text{ lt}}{1000 \text{ cm}^3} \right) = 2.455 \text{ lt}$$

Por lo tanto el volumen de la tapa es de 2.455 litros.

### 5.5.2. Volumen del cuerpo del biodigestor.

Para el cálculo del volumen del cuerpo del biodigestor “ $V_{Cuerpo}$ ” se dividió el volumen total en tres volúmenes de figuras más simples, en donde se distingue 1/4 de un toroide “ $V_1$ ” y dos cilindros “ $V_2$  y  $V_3$ ”, esto se puede apreciar en la figura 5.4; y para el cálculo emplearemos la ecuación 5.1 cuya fórmula determina el volumen de un cilindro y la ecuación 5.7 que determina el volumen de un toroide sólo que dividida entre cuatro para nuestro caso en particular.



**Figura 5.4.- Detalle de los tres volúmenes que conforman el cuerpo del biodigestor.**

$$V_{Cuerpo} = V_1 + V_2 + V_3 \quad \text{(Ecuación 5.6)}$$

$$V_1 = \frac{1}{4} 2\pi^2 Rr^2 \quad \text{(Ecuación 5.7) donde } R=15.5\text{cm; } r=2\text{cm}$$

$$V_2 = \frac{\pi d^2}{4} h \quad \text{donde } h = 2\text{cm; } d = 31\text{cm}$$

$$V_3 = \frac{\pi d^2}{4} h \quad \text{donde } h = 30\text{cm; } d = 35\text{cm}$$

Por lo tanto los resultados son:

$$V_1 = \frac{2\pi^2 (15.5 \text{ cm})(2 \text{ cm})^2}{4} = 305.958 \text{ cm}^3$$

$$V_2 = \frac{\pi(31 \text{ cm})^2}{4} (2 \text{ cm}) = 1509.535 \text{ cm}^3$$

$$V_3 = \frac{\pi(35 \text{ cm})^2}{4} (30 \text{ cm}) = 28863.383 \text{ cm}^3$$

Sustituyendo estos resultados en la ecuación 5.6, se obtuvo el volumen teórico del cuerpo del biodigestor, que es:

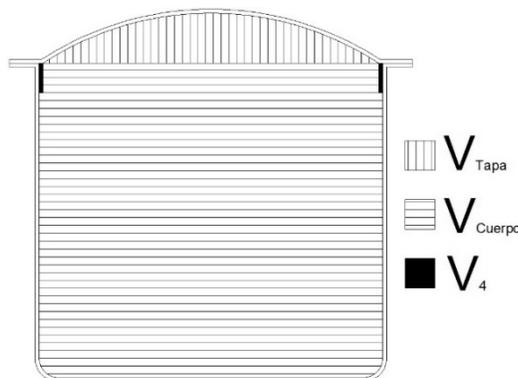
$$V_{\text{Cuerpo}} = [305.958 + 1509.535 + 28863.383] \text{ cm}^3 = 30678.876 \text{ cm}^3 \left( \frac{1 \text{ lt}}{1000 \text{ cm}^3} \right)$$

$$V_{\text{Cuerpo}} = 30.679 \text{ lt}$$

El volumen estimado del cuerpo del biodigestor es de 30.679 litros.

### 5.5.3. Volumen total.

El volumen total “ $V_{\text{Total}}$ ” esta definido por el volumen de la tapa, el volumen del cuerpo y un pequeño volumen proveniente de la tapa que se debe restar al que se definió como “ $V_4$ ”, como se aprecia en la figura 5.5 y por lo tanto el volumen total está dado por la ecuación 5.8.



**Figura 5.5.- Detalle de los volúmenes que conforman el volumen total del biodigestor.**

$$V_{Total} = V_{Tapa} + V_{Cuerpo} - V_4 \quad \text{(Ecuación 5.8)}$$

$$V_4 = \frac{\pi(35 \text{ cm})^2(3 \text{ cm})}{4} - \frac{\pi(34.2 \text{ cm})^2(3 \text{ cm})}{4} = 130.439 \text{ cm}^3 \left( \frac{1 \text{ lt}}{1000 \text{ cm}^3} \right)$$

$$V_4 = 0.130 \text{ lt}$$

Sustituyendo obtenemos:

$$V_{Total} = (2.455 + 30.679 - 0.1304) \text{ lt} = 33.004 \text{ lt}$$

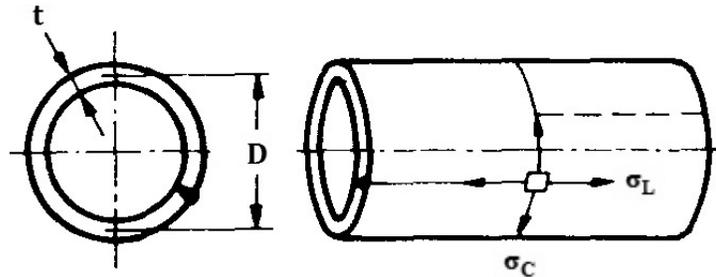
Por lo tanto nuestro biodigestores tendrá una capacidad de 33 litros.

## 5.6. PRESIÓN MÁXIMA QUE SOPORTA EL RECIPIENTE.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la prueba de tensión, se calculó la presión máxima interna que puede resistir el recipiente. Dentro de un recipiente de forma cilíndrica sometido a presión, se encuentran esfuerzos en dirección longitudinal " $\sigma_L$ " y en dirección circunferencial " $\sigma_C$ " como se pueden apreciar en la figura 5.6. También en todos los recipientes se produce un concentración de esfuerzos en los extremos del mismo, es decir para este caso, la concentración mayor de esfuerzos se estima es en la base del cuerpo del biodigestor que definimos como " $\sigma_B$ " y en la tapa del biodigestor definido como " $\sigma_T$ " para ello utilizamos las ecuaciones 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12.

La presión interna a la que está sujeto el elemento más débil, determina la presión máxima de operación del recipiente, es decir, el elemento que soporte la menor presión determina la presión que no debe exceder el recipiente.

Dado que los manómetros considerados para la cuantificación de la presión del biogás dentro de los recipientes están dados en psi o lb/in<sup>2</sup>, se determinaron los resultados en el sistema inglés.



**Figura 5.6.- Diagrama de cuerpo libre del esfuerzo longitudinal " $\sigma_L$ " y el esfuerzo circunferencial  $\sigma_C$ ".**

Fuente: Megyesy, Eugene. Manual de recipientes a presión, diseño y calculo.

El esfuerzo longitudinal se calculó mediante la ecuación 5.9:

$$\sigma_L = \frac{PD}{2t} \quad \text{(Ecuación 5.9)}$$

Para calcular el esfuerzo circunferencial se utilizó la ecuación 5.10:

$$\sigma_C = \frac{PD}{4t} \quad \text{(Ecuación 5.10)}$$

Donde:

$\sigma_L$  → Esfuerzo longitudinal ejercido en el recipiente.

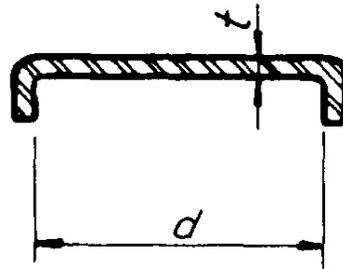
$\sigma_C$  → Esfuerzo circunferencial ejercido en el recipiente.

$P$  → Presión interna o externa a la que está sometido el recipiente.

$D$  → Diámetro medio del recipiente.

$t$  → Espesor del recipiente.

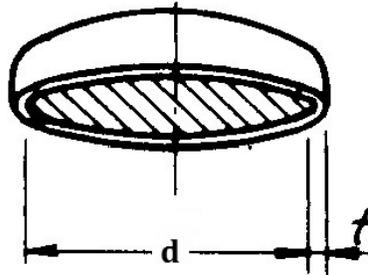
La presión máxima que soporta la base del biodigestor según su forma, como la que se aprecia en la figura 5.7 está definida por la ecuación 5.11.



**Figura 5.7.- Según la forma que se muestra en esta figura se tiene la ecuación 5.11.**  
Fuente: Megyesy, Eugene. Manual de recipientes a presión, diseño y calculo.

$$P_B = \frac{t^2 \sigma_B}{0.13d^2} \quad \text{(Ecuación 5.11)}$$

Para la presión que soporta la tapa según su forma como la de la figura 5.8, está dada por la ecuación 5.12, que se muestra a continuación.



**Figura 5.8.- Según la forma que se muestra en esta figura se tiene la ecuación 5.12.**  
Fuente: Megyesy, Eugene. Manual de recipientes a presión, diseño y calculo.

$$P_T = \frac{2\sigma_T t}{d + 0.2t} \quad \text{(Ecuación 5.12)}$$

Sabemos de la prueba de tensión, que el plástico reforzado con fibra de vidrio, resiste un esfuerzo máximo a la tensión de 884.55 Kg/cm<sup>2</sup>, este valor es el máximo esfuerzo que pueden resistir todos los componentes del biodigestor, es decir:

$$\sigma_L = \sigma_C = \sigma_B = \sigma_T = 884.55 \frac{kg_f}{cm^2}$$

Convertido a psi tenemos:

$$\sigma_L = \sigma_C = \sigma_B = \sigma_T = 884.55 \frac{kg_f}{cm^2} \left[ \frac{2.205 lb_f}{1 kg_f} \right] \left[ \frac{(2.54 cm)^2}{(1 in)^2} \right] = 12583.412 \frac{lb_f}{in^2}$$

El prototipo es un recipiente cilíndrico con diámetro interior de 35 cm y un espesor de pared 0.4 cm, por lo tanto, el diámetro medio es de 35.4 cm.

Convirtiendo estos datos a pulgadas “in” se tiene:

$$d = 35 cm \left[ \frac{1 in}{2.54 cm} \right] = 13.78 in$$

$$D = 35.4 cm \left[ \frac{1 in}{2.54 cm} \right] = 13.937 in$$

$$t = 0,4 cm \left[ \frac{1 in}{2.54 cm} \right] = 0.157 in$$

Para determinar la presión máxima cuando el esfuerzo es longitudinal y circunferencial, se despejó la presión “P” de las ecuaciones 5.9 y 5.10, para determinar la ecuación 5.13 y 5.14.

$$\sigma_L = \frac{PD}{2t} \rightarrow P_L = \frac{2\sigma_L t}{D} \quad \text{(Ecuación 5.13)}$$

$$\sigma_C = \frac{PD}{4t} \rightarrow P_C = \frac{4\sigma_C t}{D} \quad \text{(Ecuación 5.14)}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 5.13:

$$P_L = \frac{2 \left( 12583.412 \frac{lb_f}{in^2} \right) (0.157 in)}{13.937 in} = 284.371 \frac{lb_f}{in} = 284.371 psi$$

En forma similar para la ecuación 5.14 se tiene:

$$P_c = \frac{4 \left( 12583.412 \frac{lb_f}{in^2} \right) (0.157 in)}{13.937 in} = 568.742 psi$$

Ahora sustituyendo valores para la ecuación 5.11.

$$P_B = \frac{t^2 \sigma_B}{0.13d^2} = \frac{(0.157 in)^2 \left( 12583.412 \frac{lb_f}{in^2} \right)}{0.13(13.78 in)^2} = 12.643 psi$$

Para la ecuación 5.12 se obtiene:

$$P_T = \frac{2\sigma_T t}{d + 0.2t} = \frac{2 \left( 12583.412 \frac{lb_f}{in^2} \right) (0.157 in)}{(13.78 in) + 0.2(0.157 in)} = 286.082 psi$$

Observando estos resultados podemos decir que el eslabón más débil del recipiente es su base, que se estima soportara una presión máxima de 12.643 psi de presión, valor que deberá ser revisado constantemente a fin de evitar la posible rotura del recipiente. Se recomienda liberar el biogás generado cuando este llegue a una presión de aproximadamente de siete psi para tener un margen de seguridad de los recipientes.

# **CAPÍTULO 6**

## **CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA**

La fase de construcción de los doce biodigestores consistió en varias etapas, la primera de ellas fue la fabricación del molde para el cuerpo del biodigestor de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV), y en base a este, se fabricaron todas las piezas necesarias. Para ello se fabricó un premolde utilizando un tubo de cartón o sonotubo con diámetro interior de 35 cm, para los redondeos se utilizó manguera de una pulgada y para la parte superior, se cortó un aro de MDF con diámetro interior de 35 cm y exterior de 41 cm. Posteriormente se realizó el proceso de fabricación del PRFV, el cual consistió en:

1. Aplicar cera desmoldante. Se aplicaron siete capas dejando secar entre capa y capa.
2. Aplicación del gel-coat ortoftálico mezclado previamente con un 2% de catalizador P MEC. Se aplicaron dos capas, dejando secar entre cada capa. En la figura 6.1 se aprecia la aplicación de la primera capa de gel-coat al premolde.



**Figura 6.1.- Aplicación de gel-coat al premolde.**

3. Aplicación de resina ortoftálica previamente mezclada con un 2% de catalizador. Inmediatamente se colocó un poco de la manta de fibra de vidrio para posteriormente colocar más resina sobre esta, permitiendo que la fibra absorba la resina y quede encapsulada, una vez seca se procedió a colocar otra capa más siguiendo el mismo procedimiento.

- Desmolde de la pieza. Para la extracción de la pieza, se dejó secar durante 48 horas, con la finalidad de asegurar que la pieza estuviera perfectamente seca y hubiera adquirido todas sus propiedades. En este caso, el premolde fue destruido para poder realizar la extracción de la pieza. La extracción del molde se observa en la figura 6.2.



**Figura 6.2.- Extracción del molde.**

- Se lijó y resanó la pieza con pasta automotriz para eliminar imperfecciones en la superficie. El molde y el resanado del mismo se puede apreciar en la figura 6.3.



**Figura 6.3.- Molde (izquierda) y resanado del molde (derecha).**

Con el molde se procedió a obtener el cuerpo del biodigestor, aplicando el mismo procedimiento que se describió anteriormente, cambiando el gel-coat ortoftálico por isoftálico, el cual como se describió en el capítulo cuatro, nos brinda una buena resistencia química, otro cambio en el proceso de fabricación fue que además de las dos capas de fibra se agregaron una serie de refuerzos en la parte inferior del recipiente para permitir una mayor resistencia a la presión. En la figura 6.4 se observa la aplicación de fibra de vidrio sobre la pieza. Posteriormente, después de esperar el completo secado y fraguado de la pieza, que fue aproximadamente dos días, se procedió a desmoldarlo, cabe mencionar que se tuvieron que realizar dos perforaciones en la parte inferior del molde, debido a que nos percatamos de la formación de vacío entre la pieza y el molde, lo cual impedía desmoldar nuestra pieza. Ya con las perforación se evitó el vacío y el desmolde resulto un poco más simple. La pieza desmoldada se puede apreciar en la figura 6.5.

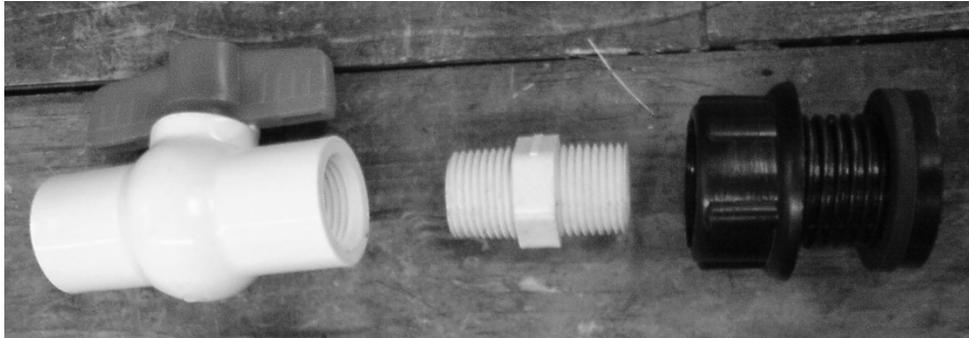


**Figura 6.4.- Aplicación de fibra de vidrio sobre la pieza.**



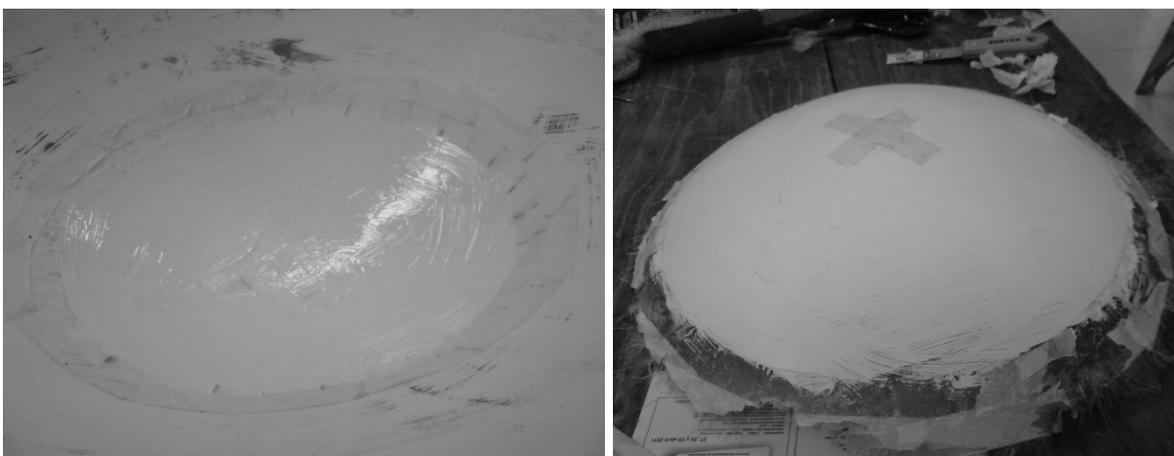
**Figura 6.5.- Molde y pieza final.**

Ya teniendo la pieza desmoldada, se realizaron las perforaciones para la salida de las muestras, a una altura de 5.5 cm medida desde la base, y finalmente la colocación de sus conexiones, como las que se muestran en la figura 6.6, que constituyen la salida para la extracción de muestras en esta pieza.



**Figura 6.6.- Conexiones de la salida para la extracción de muestras.**

La tapa se fabricó en dos partes, para la primera parte se utilizó como premolde, el molde para parábolas realizado en el laboratorio de investigación de energías renovables para otros proyectos, al cual se le aplicó el mismo proceso descrito anteriormente. La aplicación de gel-coat ortoftálico sobre el premolde y el molde obtenido se aprecia en la figura 6.7.



**Figura 6.7.- Aplicación de gel-coat sobre el molde de parábolas (izquierda) y molde de primera parte de la tapa (derecha).**

Para la segunda parte de la tapa, la pieza se obtuvo directamente de cada uno de los biodigestores con la finalidad de que fuera exacto para cada uno de ellos y evitar fugas. En la figura 6.8 se observa la segunda parte de la tapa. Una vez obtenidas ambas piezas, se unieron aplicando varias capas de resina y así evitar las fugas.



**Figura 6.8.- Parte extraída de la base.**

En la figura la 6.9 se ve la preparación de las piezas que constituyen la tapa para la aplicación de resina y fibra de vidrio.



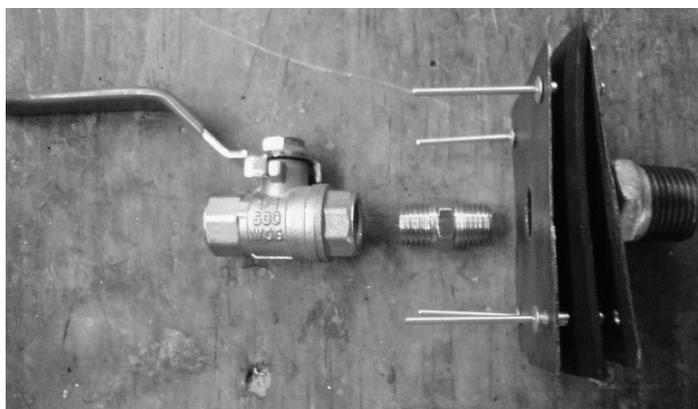
**Figura 6.9.- Piezas de la tapa colocada para ser unidas con más resina y fibra de vidrio.**

Una vez unidas las tapas se procedió a dar el acabado final mediante un moto-tool, la pieza terminada se muestra en la figura 6.10.



**Figura 6.10.- Tapas terminadas.**

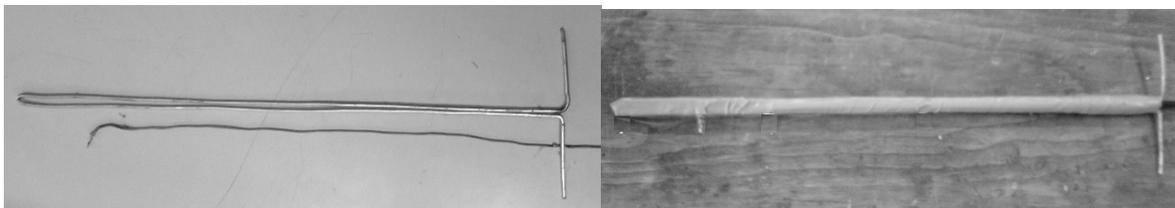
Para finalizar la tapa se realizaron cuatro perforaciones de 1/8 de pulgada para poder remachar la salida, una perforación para el paso de las conexiones de aproximadamente 16 mm y una perforación más de 1/8 de pulgada para introducir el cable termopar, una vez colocados estos elementos se colocó más fibra y resina sobre las perforaciones a fin de evitar posibles fugas en estas partes. Las partes que constituyen la salida de gas se ven en la figura 6.11.



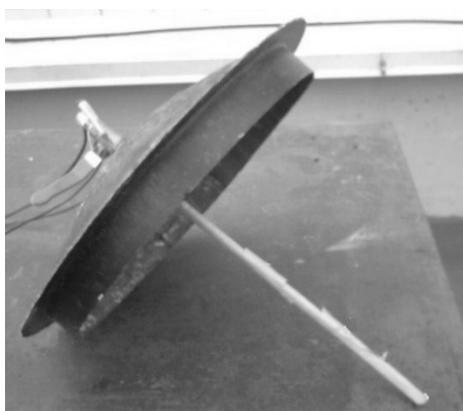
**Figura 6.11.- Conexiones para la salida de gas.**

En lo que respecta a la colocación de los termopares, se decidió colocar uno en un soporte como se muestra en la figura 6.12, y se colocó a una altura de 5 cm de la base del recipiente, para que en todo momento estuviera en contacto con la mezcla de materia

orgánica y agua. Se fijó a la tapa mediante el uso de varias capas de resina y fibra de vidrio. En la figura 6.13 se aprecia el termopar colocado en la tapa.

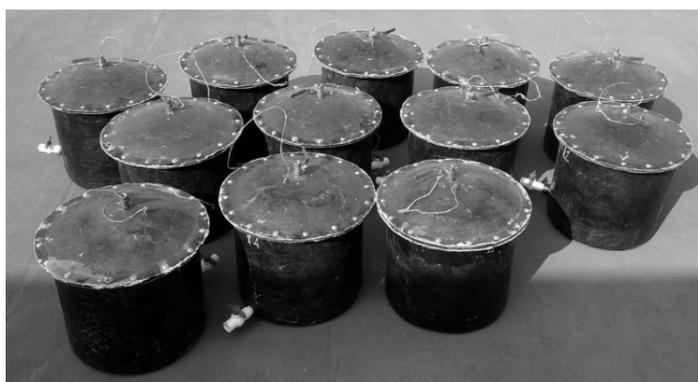


**Figura 6.12.-Partes que constituyen el termopar (izquierda) y termopar armado (derecha).**



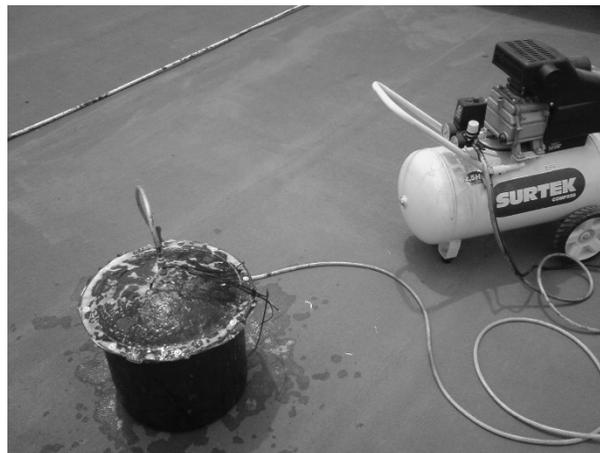
**Figura 6.13.-Tapa terminada.**

Todo el proceso mencionado hasta aquí, se repitió sucesivamente hasta lograr la fabricación de doce biodigestores, es decir doce cuerpos y doce tapas, cada uno con sus respectivas conexiones y todos fueron numerados para su posterior identificación. En la figura 6.14 se muestra a los doce biodigestores terminados.



**Figura 6.14.- Biodigestores terminados.**

La siguiente y última etapa fue la realización de pruebas de sellado a los doce biodigestores, mediante una compresora como se observa en la figura 6.15. Los biodigestores fueron llenados de aire por la salida de gas a una presión aproximada de 7 psi y con agua con jabón comprobamos que no existieran fugas, en donde fueron detectadas pequeñas fugas se le colocó una capa más de fibra de vidrio y resina, para posteriormente ponerlos en marcha.



**Figura 6.15.- Pruebas de sellado.**

# **CAPÍTULO 7**

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Para cumplir con el objetivo de observar el comportamiento de la generación de metano al emplear la materia orgánica disponible en la FES Cuautitlán, se realizaron dos pruebas experimentales, en las cuales se utilizaron cinco muestras de materia orgánica a diferentes proporciones de materia orgánica y agua para formar el sustrato, dos de ellas con tres diferentes proporciones y las tres restantes con dos diferentes proporciones. Las muestras fueron tomadas directamente de los establos con la finalidad de que fueran muestras frescas. En la figura 7.1 se presenta el proceso de recolección de las muestras.



**Figura 7.1.- Recolección de la materia orgánica.**

En la primera prueba experimental se utilizaron como muestras: poda de pasto, excremento de conejo, excremento de borrego, excremento de vaca y desechos de comida. Las proporciones utilizadas para cada una de las muestras y el número de biodigestor en el que fue colocada cada una de estas, se presentan en la tabla 7.1.

La prueba se realizó en el periodo comprendido entre el 14 de agosto hasta el 06 de noviembre de 2013, para contabilizar un total de 84 días, las lecturas realizadas a cada uno de los biodigestores fueron de presión, mediante manómetros de baja presión, para cuando la presión fue inferior a 2 psi y para presiones mayores a 2 psi, un manómetro normal cuya escala va desde los 0 psi hasta 14 psi y la temperatura, fue mediante los termopares conectados a termómetros digitales. Ambas lecturas se realizaban simultáneamente y en promedio cuatro lecturas diarias, de lunes a viernes, durante el tiempo que estuvieron en funcionamiento.

**Tabla 7.1.- Proporciones de materia orgánica y agua (sustrato) para la primera puesta en marcha.**

<b>Materia Orgánica</b>	<b>Proporción 1 (Materia Orgánica y Agua)</b>	<b>Proporción 2 (Materia Orgánica y Agua)</b>	<b>Proporción 3 (Materia Orgánica y Agua)</b>
Poda de pastos	1:1 Biodigestor 2	2:1 Biodigestor 3	-
Excremento de Conejo	1:1 Biodigestor 10	2:1 Biodigestor 11	-
Excremento de Borrego	1:1 Biodigestor 12	2:1 Biodigestor 1	-
Excremento de Vaca	1:1 Biodigestor 7	2:1 Biodigestor 8	3:1 Biodigestor 9
Desechos de Comida	1:1 Biodigestor 4	2:1 Biodigestor 5	3:1 Biodigestor 6

El pH se midió mediante tiras reactivas de tornasol, se realizaron una prueba inicial y una más cada semana hasta el final de la prueba.

Mediante el Analizador de gases marca MADUR, con sensores NDIR y electrolíticos, se realizaron mediciones de metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) y oxígeno (O<sub>2</sub>) del biogás generado dentro de los biodigestores. Las pruebas se realizaron cuando alcanzaban una presión mayor a 6 psi.

En las gráficas 7.1, 7.3, 7.5, 7.7 y 7.9 se muestran las presiones acumulativas de los 12 biodigestores. Acumulativas debido a que al realizar las pruebas con el analizador de biogás, se perdía gran parte del biogás generado y se reducía la presión. También porque los recipientes soportaban una presión de siete psi, por lo que cuando se alcanzó este valor se liberó la presión, quemando el biogás generado mediante una estufa de gas Lp, cada una con su respectiva línea de tendencia polinómica de sexto grado. También en

las gráficas 7.2, 7.4, 7.6, 7.8 y 7.10 se muestra las temperaturas internas de cada recipiente La nomenclatura empleada en las gráficas se muestra a continuación:

P (N) → Presión del biodigestor “N”.

Tamb → Temperatura ambiente dentro del laboratorio.

T (N) → Temperatura del biodigestor “N”.

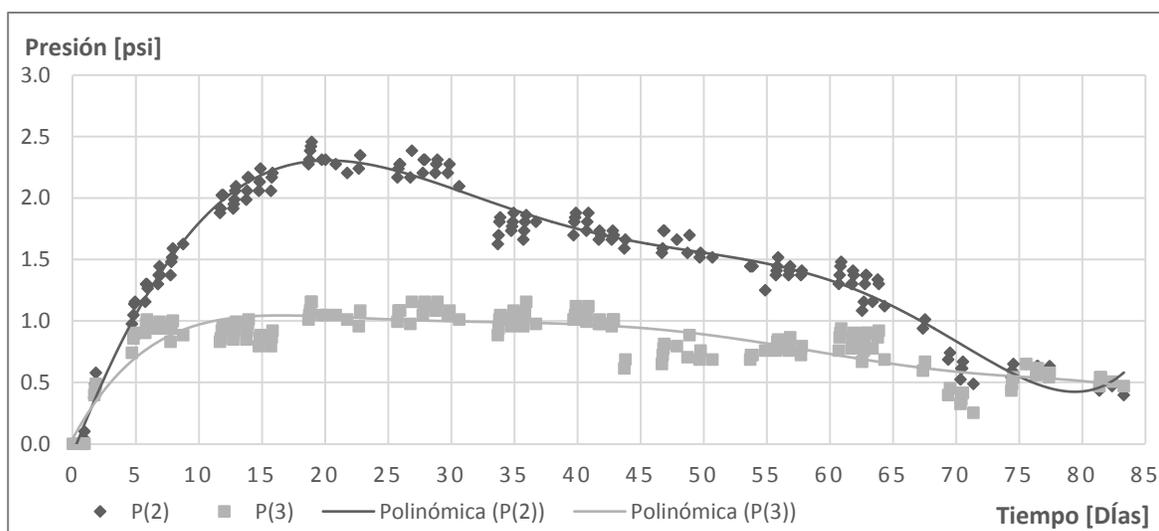
N → Indica el número de biodigestor y va del 1 al 12.

CH<sub>4</sub> (N) → Porcentaje de metano del biodigestor “N”.

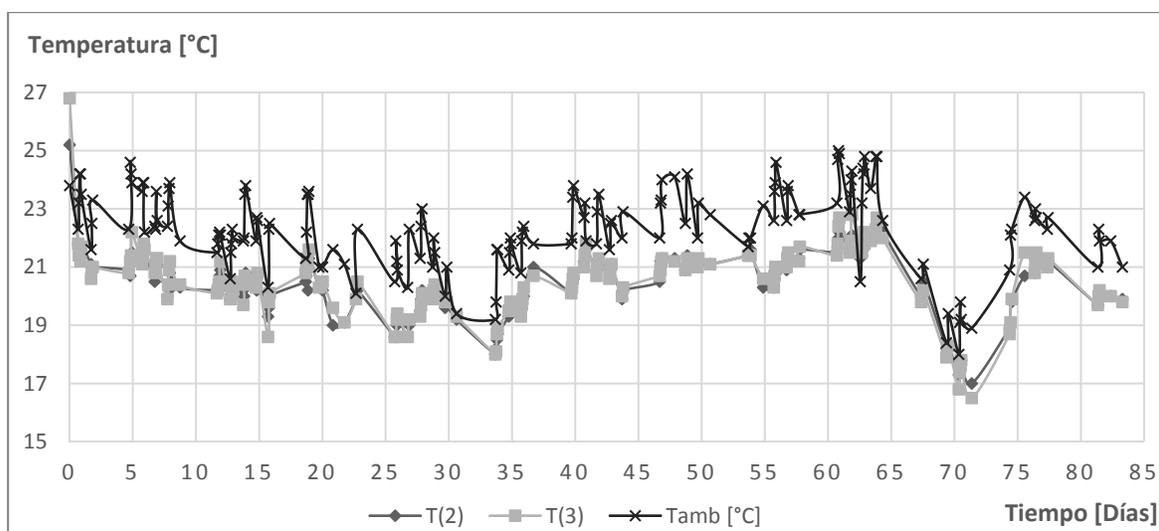
En la gráfica 7.1, se muestran las presiones alcanzadas por la poda de pastos, es decir los resultados medidos de los biodigestores 2 y 3. Como se observa, el que alcanzo una mayor presión en este tipo de materia orgánica fue la mezcla de 1:1, aun cuando sólo alcanzó un máximo de 2.4 psi, para el biodigestor 3 con mezcla 2:1 el máximo de presión fue de 1.1 psi ambos a los 19 días, a partir de entonces la presión comenzó a decaer en ambos, debido a las pruebas de pH, en donde, por la extracción de muestras del sustrato, existía una pérdida de presión considerable en cada una de ellas. La presión alcanzada se puede considerar insignificante, por lo que no es un sustrato muy recomendado para utilizarse sólo, probablemente con la adición de alguna otra materia orgánica se puede obtener una mayor generación de biogás.

En lo referente a la temperatura, la variación entre tipo de mezclas es prácticamente nulo, como se puede apreciar en la gráfica 7.2, teniendo una temperatura ligeramente mayor el biodigestor cuyo contenido de materia orgánica agua es de 1:1, en 0.2°C, ambos siempre estuvieron a una temperatura ambiente inferior en promedio de 1.5 °C, por lo tanto, la temperatura estuvo entre el rango psicrófilico y mesófilico, dado que la temperatura ambiente es igual para todos y tomó valores de 18°C como mínima y 25°C como máxima.

**Gráfica 7.1.- Presiones acumulativas alcanzadas por la poda de pastos.**



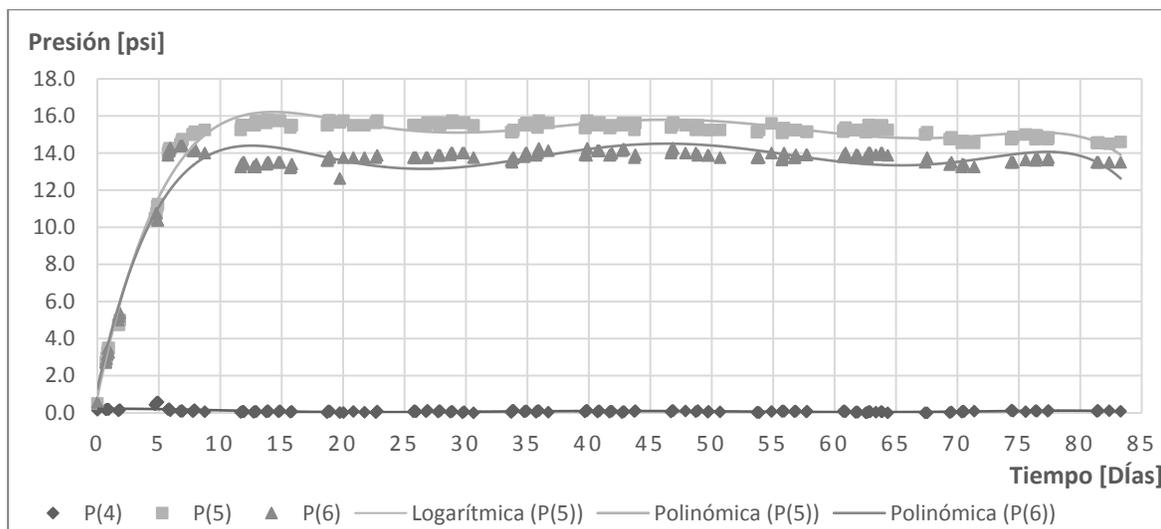
**Gráfica 7.2.- Temperatura de poda de pastos.**



En la gráfica 7.3 se muestran las presiones alcanzadas por los desechos de comida, en donde se observa que la presión se incrementa desde el inicio para los biodigestores 5 y 6, alcanzando el biodigestor 6 su máximo en diez días que fue de 14.4 psi y el biodigestor 5 obtuvo un máximo de 15.8 psi a los 14 días, , para los biodigestores 5 y 6 se puede decir, que debido al pH ácido de este compuesto, se inhibió el proceso muy probablemente entre la segunda y tercera etapa del proceso de fermentación, es decir, entre la acidogénesis y la acetogénesis, mientras que el biodigestor 4 nunca comenzó con el

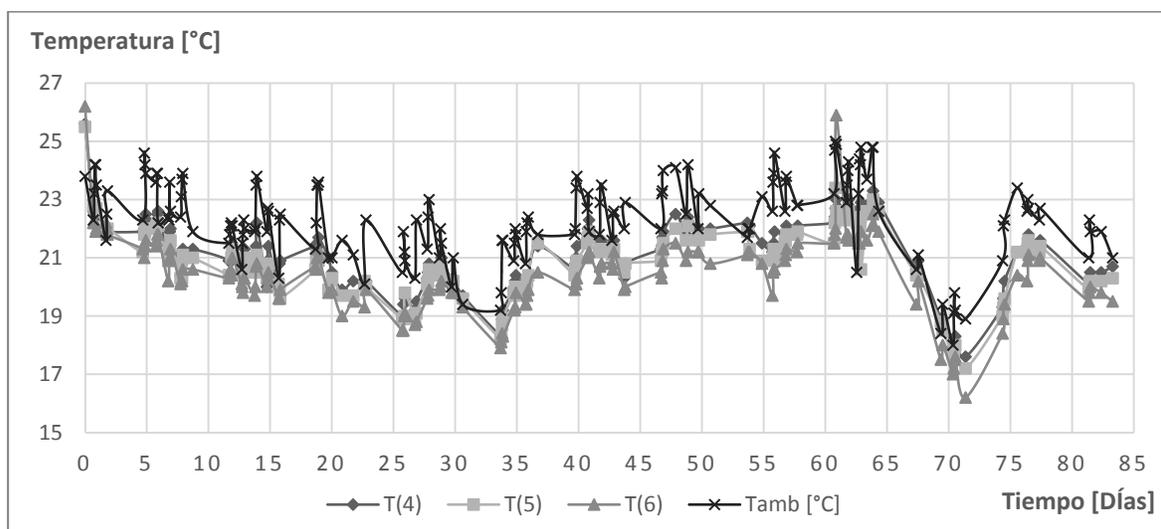
proceso de fermentación, debido a la alta acidez de esta mezcla, cabe mencionar que en las tres muestras se encontraban el desperdicio de varios cítricos, tales como cascara de piña, naranja, limón, entre otros, probables causantes del pH ácido.

**Gráfica 7.3.- Presiones acumulativas alcanzadas por los desechos de comida.**



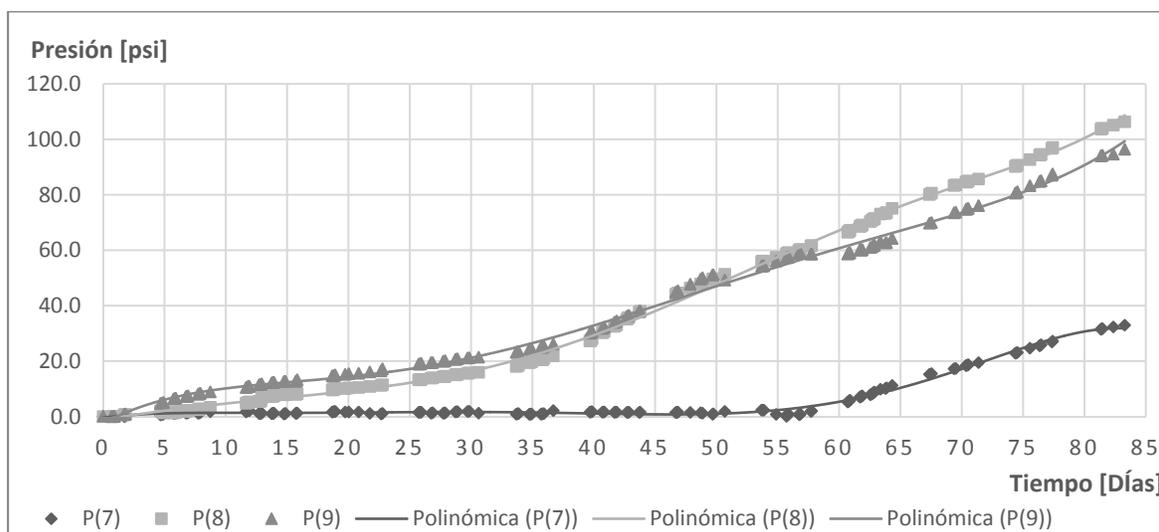
La temperatura de los desechos de comida se comportó de forma similar a los demás biodigestores, teniendo temperaturas por debajo de la temperatura ambiente y al igual que los otros se encuentran entre el rango psicrófilico y el mesófilico.

**Gráfica 7.4.- Temperatura de desechos de comida.**



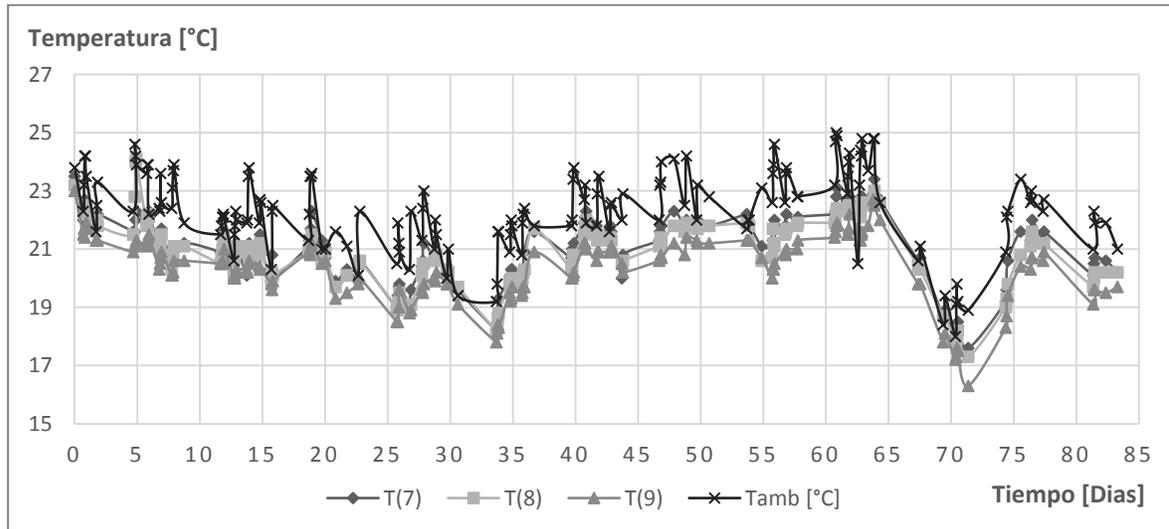
En la gráfica 7.5 se muestra la presión acumulativa para los biodigestores en los que se utilizó excremento de vaca (7, 8, y 9), en donde se observa que las mezclas 2:1 y 3:1, desde el principio comenzaron con la producción de biogás, mientras que el biodigestor con mezcla 1:1, tardó en comenzar la producción de biogás hasta el día 55, a partir de entonces, su producción de biogás aumentó considerablemente. Hasta el día de finalización de las pruebas, es decir los 84 días, se observa que ninguno de los tres ha finalizado con el proceso de degradación de la materia orgánica, se estiman al menos entre 30 y 40 días más para terminar con la fermentación, la mezcla con más producción para este tipo de materia orgánica es la del biodigestor 8 con una proporción de 2:1, al día 84 la diferencia era de 10 psi arriba del biodigestor 9, que fue superado a la mitad del proceso.

**Gráfica 7.5.- Presión acumulativa alcanzada por el excremento de vaca.**



La temperatura obtenida con el excremento de vaca se observa en la gráfica 7.6, en donde se observa el mismo comportamiento que todos los anteriores, por lo tanto nos encontramos en los mismos rangos psicrófilico y mesófilico.

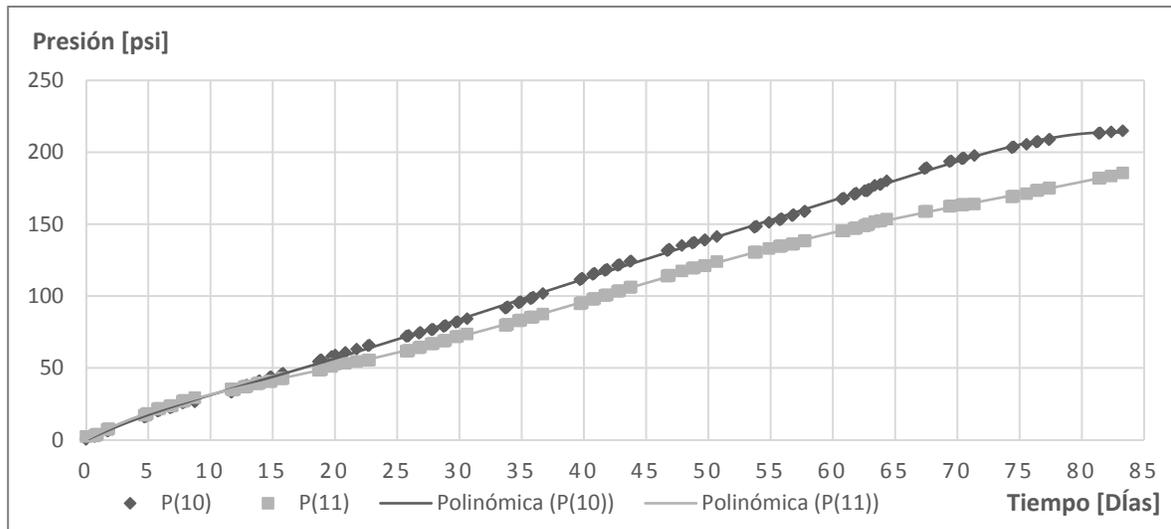
**Gráfica 7.6.- Temperatura de excrementos de vaca.**



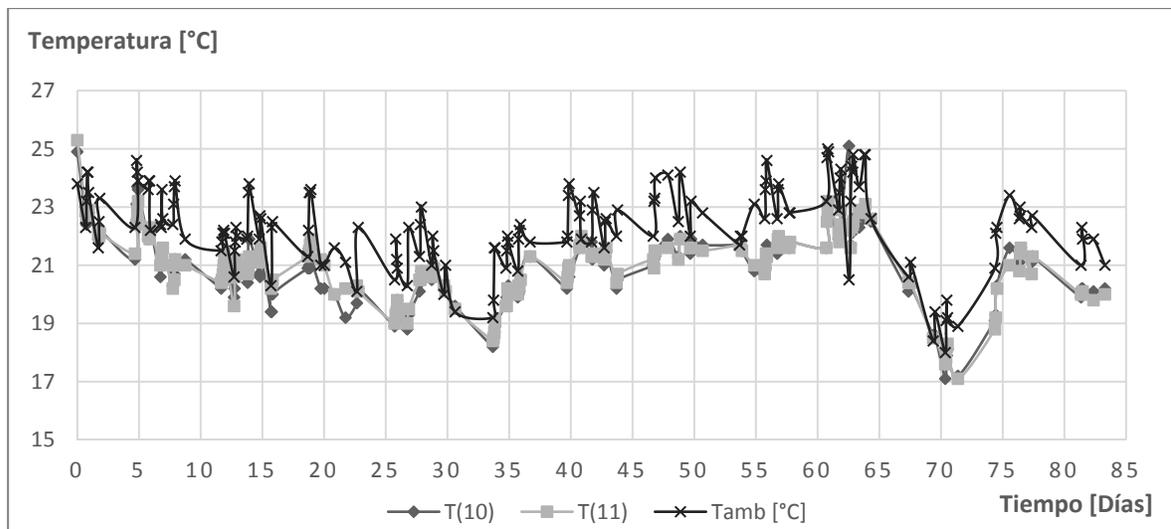
El excremento de conejo con mezclas 1:1 para el biodigestor 10 y 2:1 para el biodigestor 11, presentaron una excelente producción de biogás durante los 84 días de la prueba, como se muestra en la gráfica 7.7 ambos tuvieron un inicio muy parecido, pero a partir de los 15 días, el biodigestor 10 presento una mayor producción de biogás teniendo un incremento de aproximadamente 2.5 psi diarios y para el biodigestor 11 fue de 2.2 psi por día. Se estima que el proceso finalizaría para estas mezclas en aproximadamente 20 o 30 días más. Cabe mencionar que en general, el excremento de conejo fue el que más incremento de presión presento entre todas las muestras.

En la gráfica 7.8 se observan las temperaturas de los biodigestores 10 y 11 en donde vemos que en ambos la temperatura fue muy similar, pero el biodigestor 11 estuvo con una temperatura ligeramente mayor durante el proceso, aproximadamente unos 0.2 a 0.3 °C por encima de la temperatura registrada en el biodigestor 10. Dado que la diferencia es insignificante, el proceso de fermentación anaeróbico no se ve influenciado.

**Gráfica 7.7.- Presiones acumulativas alcanzadas por los excrementos de conejo.**

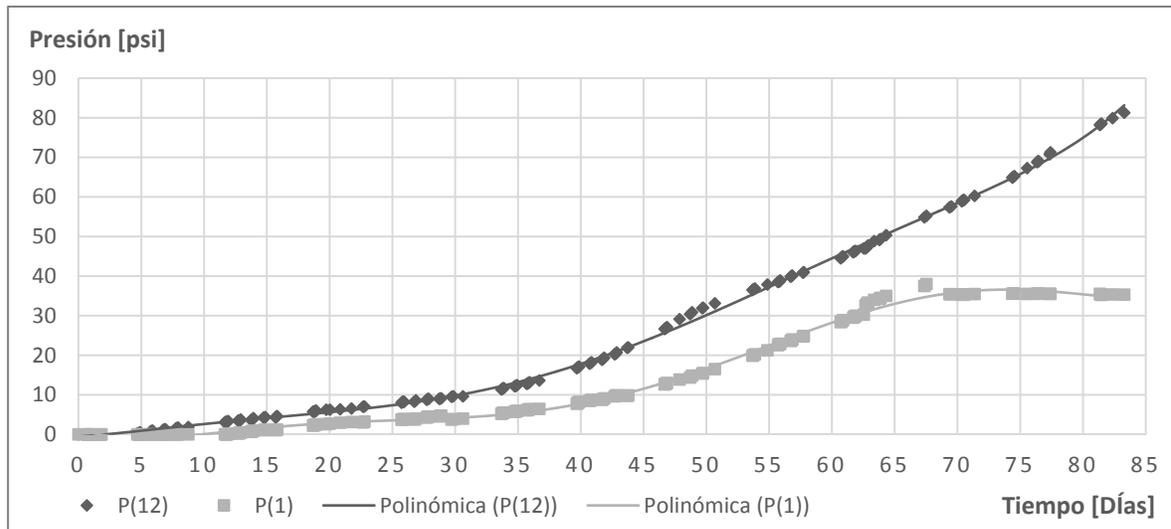


**Gráfica 7.8.- Temperatura de excrementos de conejo.**

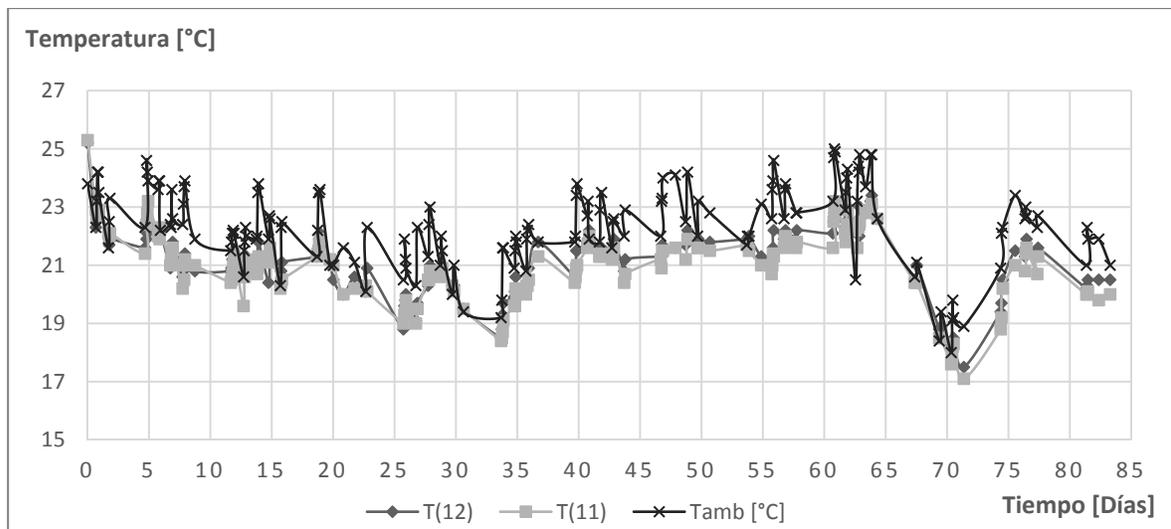


Los excrementos de borrego de los biodigestores 12 y 1 con mezclas 1:1 y 2:1 respectivamente presentaron una producción lenta durante los primeros 30 días, como se observa en la gráfica 7.9, a partir de aquí, la presión se incrementó a una tasa de 0.8 psi por día para el biodigestor 12 y se mantuvo hasta el día 84, en cambio para el biodigestor 1 el incremento de presión desde los 30 días hasta los 67 días fue de 0.4 psi por día, a partir de entonces en este biodigestor la producción de biogás cesó por completo hasta la finalización de la prueba.

**Gráfica 7.9.- Presiones acumulativas alcanzadas por los excrementos de borrego.**



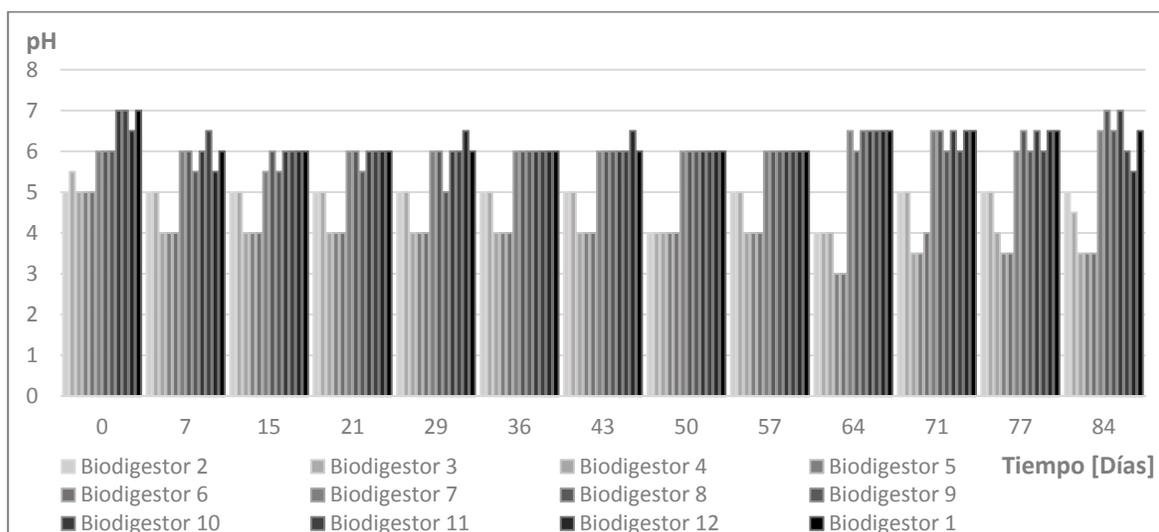
**Gráfica 7.10.- Temperatura de excrementos de borrego.**



En la gráfica 7.11 se observa el comportamiento del pH durante los 84 días de la prueba, en general, para los 12 biodigestores se muestra una acidificación conforme avanza el proceso, siendo más fuerte para los biodigestores 2, 3, 4, 5 y 6, para los desechos de pastos el pH estuvo entre 4 y 5.5, bastante ácido para el proceso de fermentación anaeróbica, por esta razón los desechos de pastos no presentaron una buena producción de biogás, los biodigestores 4, 5 y 6 de desechos de comida presentaron el mismo problema que los pastos, su pH estuvo entre los 3.5 y 5, demostrando que son mezclas

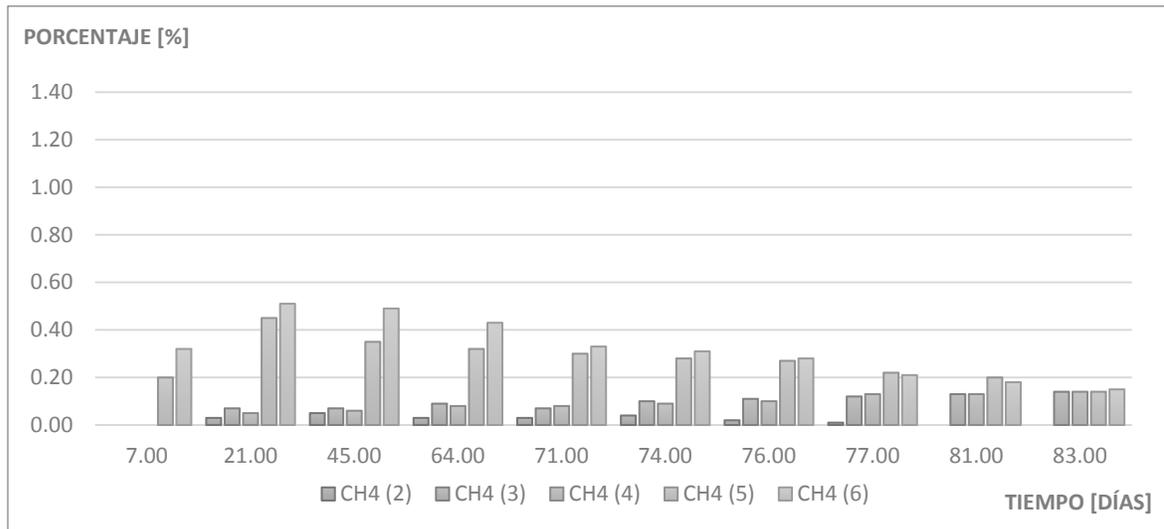
muy acidas y al igual que los pastos su producción fue pobre. Para el resto de biodigestores el pH tenia fluctuaciones durante todo el proceso, los excrementos de vaca rondaron entre 5.5 a 7, los excremento de conejo entre 6 a 7 y los excrementos de borrego estuvieron entre 5.5 a 7. El pH de todas las mezclas fue ácido en algún punto del proceso, pero los excrementos presentan una menor acidificación que los pastos y los desechos de comida, a pesar de ello estuvieron debajo de los valores óptimos de pH.

**Gráfica 7.11.- pH de los 12 biodigestores en la primera prueba.**



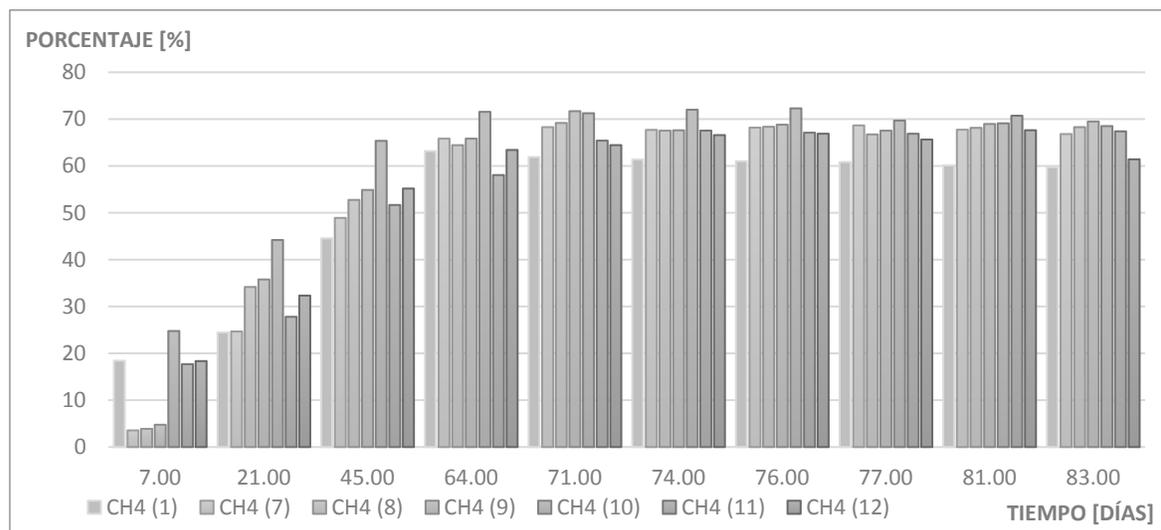
En la graficas 7.12 y 7.13 se muestra el cambio en porcentaje de metano del biogás generado durante los 84 días de la prueba. En la gráfica 12 se aprecia que para los biodigestores 2, 3, 4, 5 y 6 el porcentaje de metano (CH<sub>4</sub>) máximo fue el del biodigestor 6 que contenía desechos de comida a proporción de 3:1, que fue de apenas 0.5%, pero el de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente en los biodigestores 2 a 6, durante las pruebas fue de más del 50%, el resto fue de oxígeno y otros gases que no pueden ser detectados por el analizador, el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) para estos 5 biodigestores fue muy poco de entre 5 a los 400 ppm, denotando que en todos los biodigestores el ácido sulfhídrico es alto durante los primeros días de fermentación anaeróbica y va descendiendo conforme avanza el proceso.

**Gráfica 7.12.- Porcentaje de metano para la poda de pastos y los desechos de comida.**



La grafica 7.13 muestra la variación del porcentaje de metano con respecto al tiempo para todos los biodigestores con excrementos (biodigestores 1, 7-12), estos muestran un porcentaje de metano excelente pasados los 60 días, teniendo valores de entre 60% a 72%, el biodigestor que alcanzo el porcentaje más alto de metano fue el número 10 con excremento de conejo a proporción de 1:1, con un 72% de metano y a partir del día 60 su porcentaje mínimo fue de 68%, el biodigestor 11 que al igual que el biodigestor 10, contenía excremento de conejo y el biodigestor 9 que contenía excremento de vaca en proporción de 3:1, también presentaron un porcentaje de metano elevado entre 65% a 71%, los biodigestores 7 y 8 con excremento de vaca a proporciones de 1:1 y 2:1 respectivamente presentaron un menor porcentaje de metano, denotando que para este tipo de materia orgánica, entre más excremento se agregue a la mezcla el porcentaje es ligeramente mayor comparada con uno que contenga menos excremento de vaca. De entre todos los excrementos el que más bajo porcentaje de metano generó fueron los biodigestores 12 y 1 con excremento de borrego, de estos el que tuvo el porcentaje más alto fue el biodigestor 12 con 67% y después del día 60 nunca descendió a menos de 61% y el biodigestor 1 oscilo entre el 60% al 63%.

**Gráfica 13.- Porcentaje de metano para los excrementos.**



Debido a que en la primera prueba experimental las muestras de poda de pastos y los desechos de comida no generaron metano suficiente, se decidió a realizar una segunda prueba experimental, cambiando estas muestras por las de excremento de caballo y cabra. Por otro lado se modificaron las proporciones del sustrato con la finalidad de que se tuvieran mezclas más líquidas. En la tabla 7.2 se exponen las proporciones del sustrato y el número de biodigestor que ocuparon para cada materia orgánica utilizada en la segunda prueba.

La segunda prueba fue realizada entre el 21 de noviembre de 2013 hasta el 25 de febrero de 2014, contabilizando un total de 96 días. La toma de lecturas para el pH se mantuvo igual a la prueba anterior. Para las lecturas de presión y temperatura se tomó la misma metodología cambiando el número de lecturas a dos por día, por cinco días a la semana. Las pruebas con el analizador de gases ahora fueron de la misma forma que las de pH, una vez a la semana para permitir tener una visualización más detallada del cambio en el porcentaje de metano conforme avanza el tiempo. La nomenclatura empleada para las gráficas resultantes de la segunda pruebas es la siguiente.

**Tabla 7.2.- Proporciones de materia orgánica y agua para la segunda prueba.**

<b>Materia Orgánica</b>	<b>Proporción 1 (Materia Orgánica y Agua)</b>	<b>Proporción 2 (Materia Orgánica y Agua)</b>	<b>Proporción 3 (Materia Orgánica y Agua)</b>
Excremento de caballo	1:1 Biodigestor 1	1:2 Biodigestor 2	-
Excremento de cabra	1:1 Biodigestor 3	1:2 Biodigestor 4	-
Excremento de conejo	1:1 Biodigestor 10	1:2 Biodigestor 11	1:3 Biodigestor 12
Excremento de borrego	1:1 Biodigestor 5	1:2 Biodigestor 6	-
Excremento de vaca	1:1 Biodigestor 7	1:2 Biodigestor 8	1:3 Biodigestor 9

$P' (N)$  → Presión del biodigestor “N” para la segunda prueba.

$Tamb'$  → Temperatura ambiente dentro del laboratorio para la segunda prueba.

$T' (N)$  → Temperatura del biodigestor “N” para la segunda prueba.

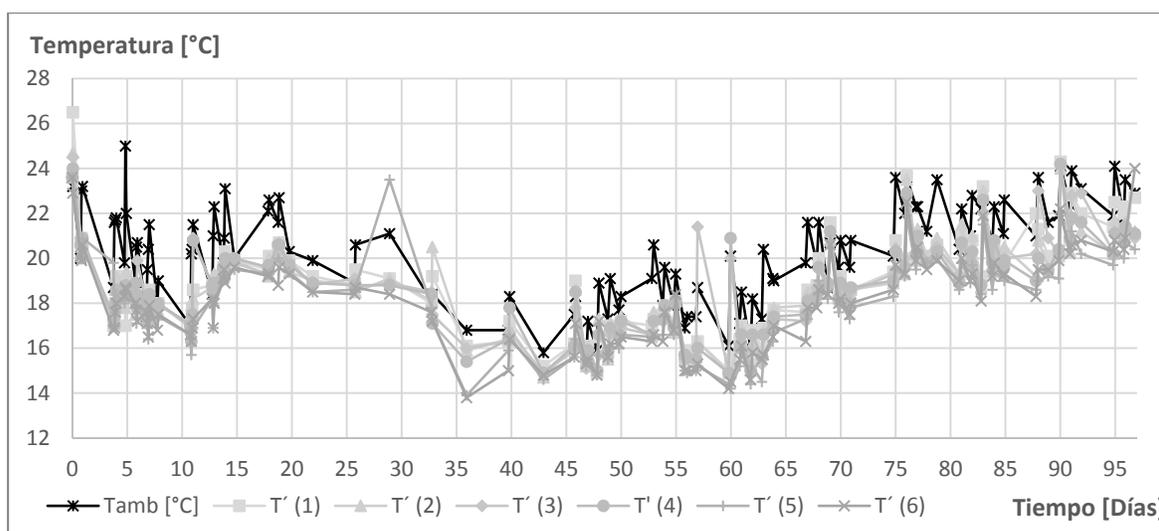
$N'$  → Indica el número de biodigestor y va del 1 al 12 para la segunda prueba.

$CH_4' (N)$  → Porcentaje de metano del biodigestor “N” para la segunda prueba.

En la gráfica 7.14, se muestran las variaciones de temperatura de los biodigestores 1 al 6 comparadas con la temperatura dentro del laboratorio, como podemos observar las temperaturas tuvieron un comportamiento muy similar a lo observado en la primera prueba, es decir, la temperatura ambiente es superior a la de los biodigestores aproximadamente entre 1.5 y 2°C, aunque algunos biodigestores en algún momento tuvieron una temperatura superior a la de ambiente, consideramos que pudo ser a que las pruebas de pH se realizaron al aire libre y se encontraban expuestos a la radiación solar, teniendo una temperatura ambiente máxima de 25°C y la mínima de 15.4°C, a comparación con la primera prueba que tuvo una mínima de 18°C, se observa que la

temperatura se mantuvo estable en los primeros 20 días, pero decayó y se mantuvo baja hasta los 60 días, a partir de aquí y hasta el final de la prueba la temperatura ascendió. La temperatura máxima y mínima para el biodigestor 1 fueron de 26.5 y 14.9°C, en el biodigestor 2 fueron de 24.7 y 14.7°C, para el biodigestor 3 de 24.5 y 24.9°C, dentro del biodigestor 4 las temperaturas fueron de 24.2 y 14.9°C, en el biodigestor 5 de 23.6 y 13.9°C y para el biodigestor 6 fueron 24 y 13.8°C. Las temperaturas más bajas se presentaron un poco antes de la mitad de la prueba, por ello en la mayoría de biodigestores, se presentó una disminución en la producción de biogás.

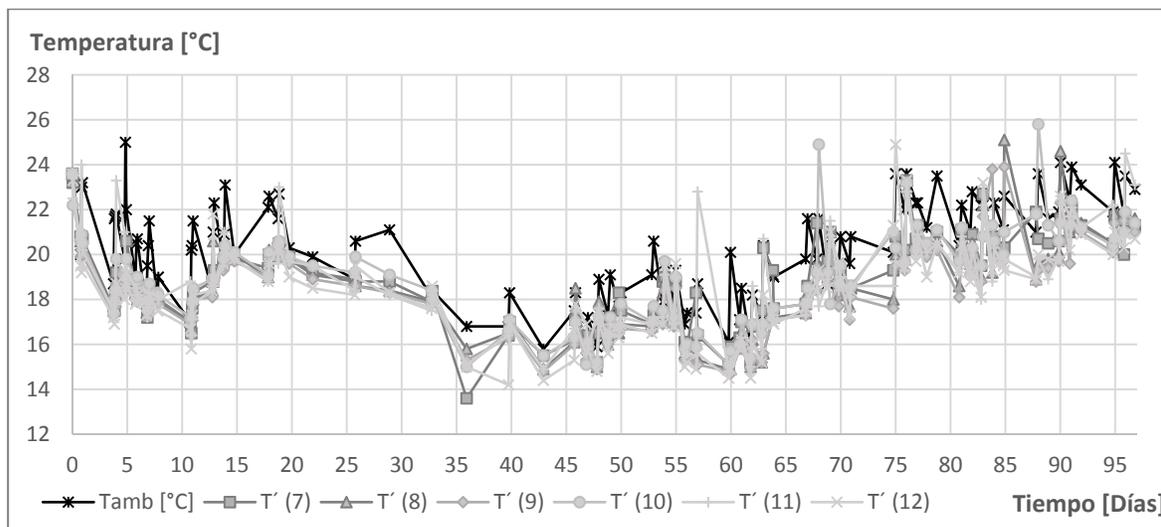
**Gráfica 7.14.- Temperatura de los biodigestores 1 al 6.**



En la gráfica 15 se observa el comportamiento de la temperatura del resto de biodigestores (7 al 12). Tenemos que las temperaturas máximas para el biodigestor 7 fue de 23.6°C, para el 8 de 25.1°C, para el 9 de 23.6°C, para el 10 fue de 25.8°C, para el 11 24.5°C y para el 12 de 24.9°C, las temperaturas mínimas para estos 6 biodigestores comenzado con el numero 7 hasta el 12 son de: 13.6°C, 14.9°C, 14.7°C, 15°C, 14.8°C y 14.2°C respectivamente. Se observa que, los doce biodigestores tienen temperaturas relativamente similares, donde en base a la primera y segunda prueba se puede decir que la relación entre materia orgánica : agua no tiene una relación directa con la temperatura, notando que la única que influye sobre la temperatura de la mezcla, es la temperatura

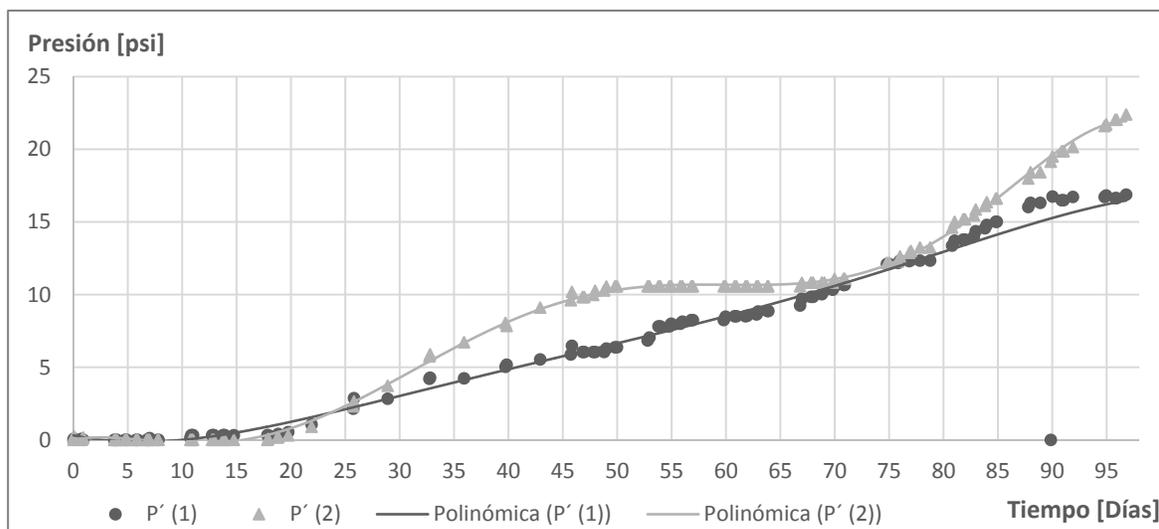
ambiente en todo momento, dado que si la temperatura ambiente sube la temperatura interior también ascenderá y viceversa si la temperatura ambiente cae.

**Gráfica 7.15.- Temperatura de los biodigestores 7 al 12.**



En las gráficas 7.16, 7.17, 7.18, 7.20 y 7.22 se muestran las presiones acumulativas para cada una de las materias orgánicas utilizadas, en la primera de ellas, en la gráfica 7.16, se observa que los excrementos de caballos generan dentro del biodigestor un incremento de presión muy bajo, ya que como se observa en la gráfica 7.16, en 96 días, el biodigestor 1 con excretas de caballo y con mezcla 1:1 ha alcanzado una presión acumulada de 16.9 psi y el biodigestor 2 con mezcla 1:2 una presión de 22.4 psi, de ambos el que presenta mayor incremento de presión es el biodigestor 2 a pesar de que entre los 50 y 70 días su producción decayó considerablemente, se considera que es debido a que durante las pruebas de pH y las del analizador de gases se introdujo oxígeno que inhibió el proceso, en cambio en el biodigestor 1, el incremento de presión fue más lento pero más constante durante todo el proceso.

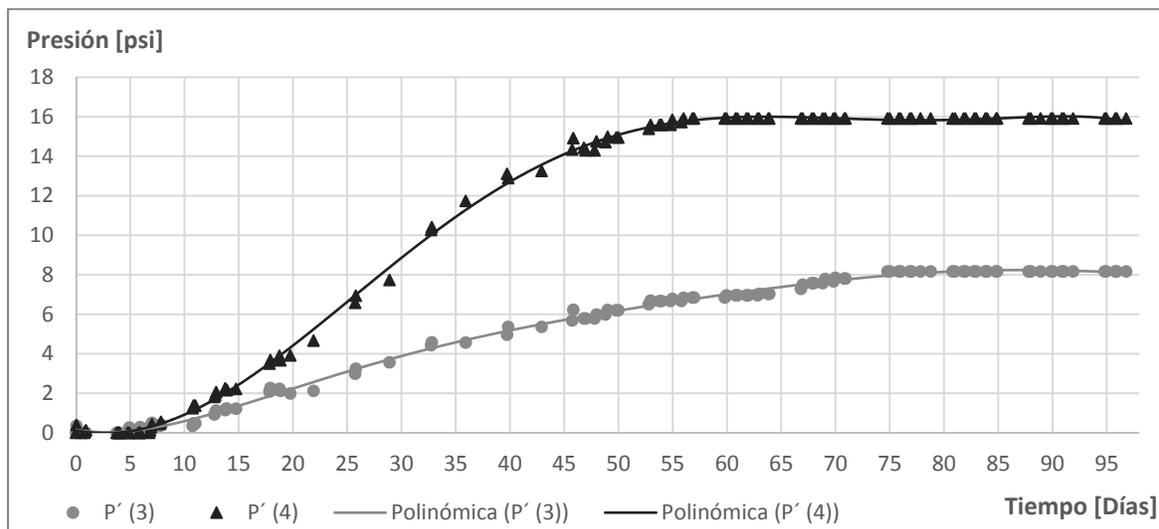
**Gráfica 7.16.- Presiones acumulativas alcanzadas por los excrementos de caballo.**



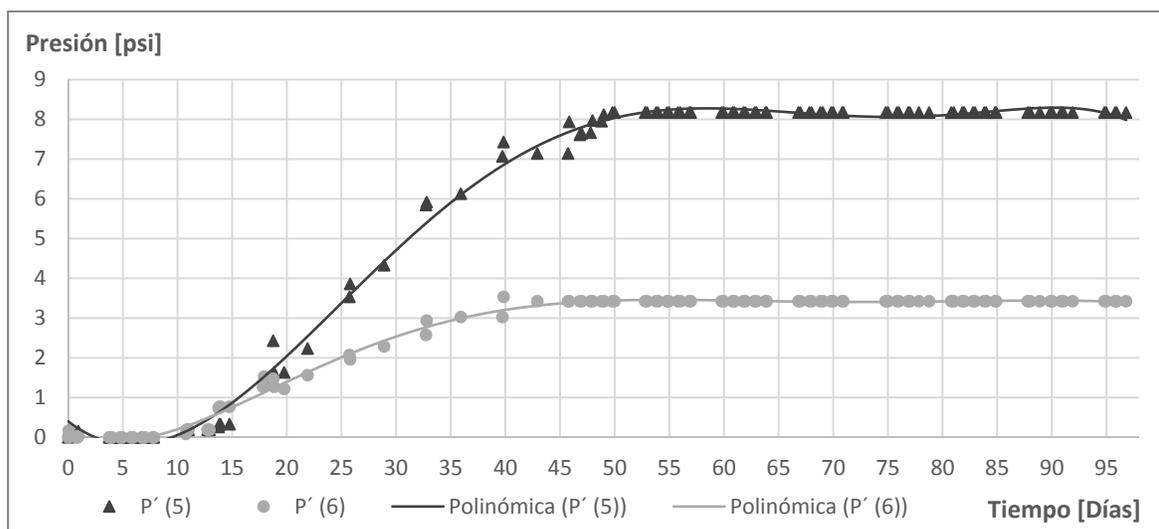
En la gráfica 7.17, se presenta la presión acumulativa para excrementos de cabra, biodigestores 3 y 4, en donde vemos que al igual que el de los excrementos de caballo, su incremento de presión es muy bajo, alcanzando la presión de 8.2 psi en el biodigestor 3, y 16.4 psi en el biodigestor 4, por lo tanto el de excremento de cabra se tiene que la mezcla 1:2 también es mejor que la mezcla 1:1. El biodigestor 3 dejó de mostrar un incremento en 75 días y el biodigestor 4 a los 55 días. Del de los excrementos de cabra podemos decir que no son una fuente eficiente para el proceso de fermentación anaeróbica en este rango de temperaturas, ya que el incremento de presión es muy bajo en ambos biodigestores.

Los biodigestores de excretas de borrego en esta segunda prueba (biodigestores 5 y 6) tuvieron un pobre incremento de presión comparada con la primera prueba realizada, como se observa en la gráfica 7.18, de ambos el biodigestor 5 a proporción de 1:1, fue el que alcanzo una mayor presión con 8.2 psi a los 50 días, a partir de entonces, el incremento de presión cesó, el biodigestor 6 su máxima presión fue de 3.4 psi y también a partir del día 50 se terminó el proceso, se considera que la producción pobre de biogás es ocasionada probablemente por las bajas temperaturas en la que estuvieron funcionando.

**Gráfica 7.17.- Presiones acumulativas alcanzadas por los excrementos de cabra.**



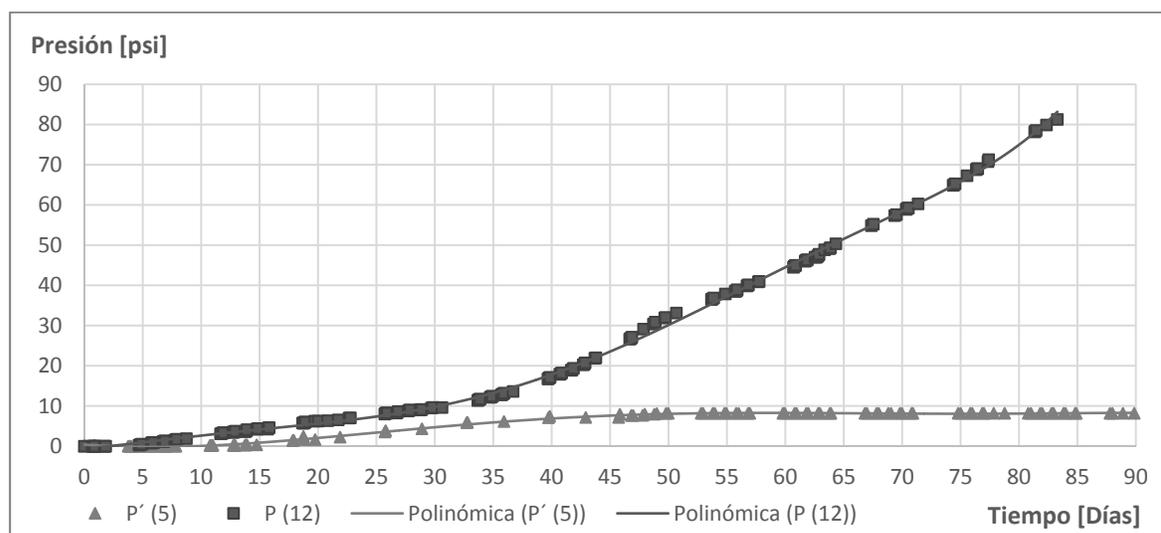
**Gráfica 7.18.- Presiones acumulativas alcanzadas por los excrementos de borrego.**



En la gráfica 7.19 se presenta una comparativa entre el biodigestor 12 de la primera prueba y el biodigestor 5 de la segunda prueba, ambos con excremento de borrego a proporción de 1:1, se observa que la diferencia entre los dos es considerable, el biodigestor 12 de la primera prueba supero por mucho al biodigestor 5 de la segunda prueba, alcanzando una presión 10 veces mayor, la baja producción del biodigestor pudo ser debido a que entre los días 30 y 60 de haber iniciado la prueba, para el biodigestor 5

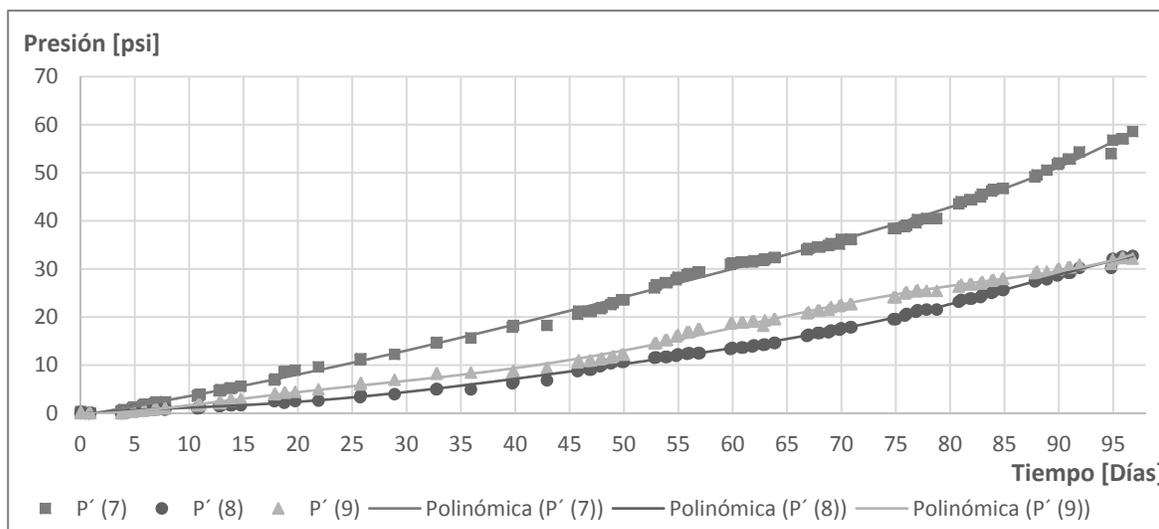
se tuvieron temperaturas muy bajas, del orden de 13.9 a 16 °C, comparadas con las del biodigestor 12 de la primera prueba que este mismo periodo fueron de entre 18.5 a 23 °C, se hace énfasis en este periodo de tiempo, porque, fue en donde precisamente el biodigestor 12 tuvo un cambio considerable en la producción de biogás, se considera que las bacterias metanogénicas se vieron afectadas por esta diferencia de temperatura.

**Gráfica 7.19.- Comparativa entre mezclas 1:1 de excremento de borrego.**



Los biodigestores 7, 8 y 9, con excremento de vaca a proporciones de 1:1, 1:2 y 1:3 respectivamente, mantuvieron un incremento de presión constante durante los 96 días de la prueba, como se puede apreciar en la gráfica 7.20, el biodigestor 7 presentó el mayor incremento de presión que fue de 58.6 psi, con una tasa de incremento de presión diaria de 0.6 psi aproximadamente, los biodigestores 8 y 9 se comportaron de forma muy similar, a excepción de los últimos días de la prueba en donde, el biodigestor 8 muestra un decremento de producción de biogás mientras que el biodigestor 9 permanece aún constante.

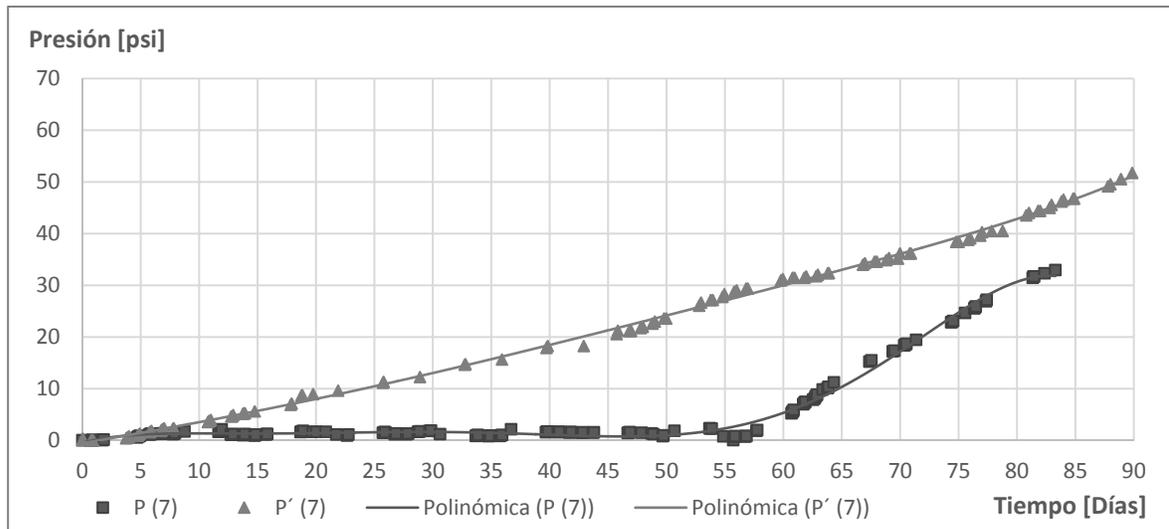
**Gráfica 7.20.- Presiones acumulativas alcanzadas por las excretas de vaca.**



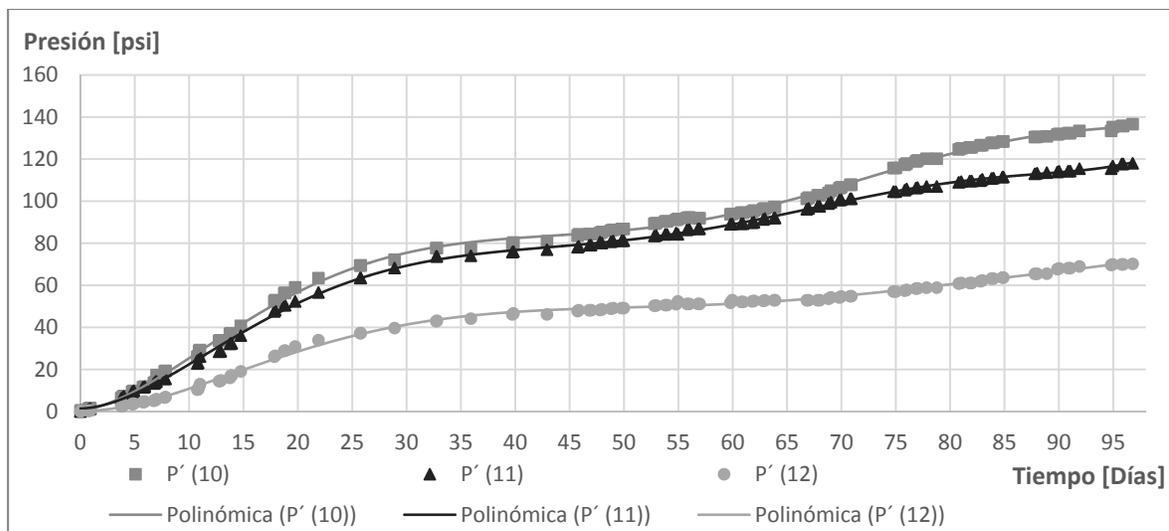
En la gráfica 7.21 se muestra una comparativa entre los biodigestores 7 de la primera y segunda prueba ambos con excremento de vaca a proporción de 1:1, en donde vemos que durante la segunda prueba el incremento de presión fue constante durante todo el proceso en cambio para la primera prueba el biodigestor comenzó a manifestar este incremento hasta pasados los 55 días, esto pudo ser debido a las pequeñas diferencias de pH entre ambas pruebas, ya que para la segunda prueba el pH de este biodigestor fue ligeramente más neutro comparado con el pH en la primera prueba. La presión acumulativa máxima alcanzada por el biodigestor 7 en la primera prueba fue de 33 psi mientras que en la segunda prueba fue de 58.6 psi.

Los excrementos de conejo a proporciones de 1:1, 1:2 y 1:3 de los biodigestores 10, 11 y 12 respectivamente, tuvieron un incremento de presión muy bueno para los biodigestores 10 y 11 que alcanzaron un valor de presión acumulado de 136.6 psi para el biodigestor 10 y 118 psi para el biodigestor 11, como se observa en la gráfica 7.22. Los tres biodigestores se comportaron de forma similar, presentando una pendiente mayor durante los primeros 20 días y menor para el resto del proceso, esto lo puede explicar la temperatura que fue disminuyendo diariamente durante el proceso.

**Gráfica 7.21.- Comparativa entre mezclas 1:1 de excremento de vaca.**

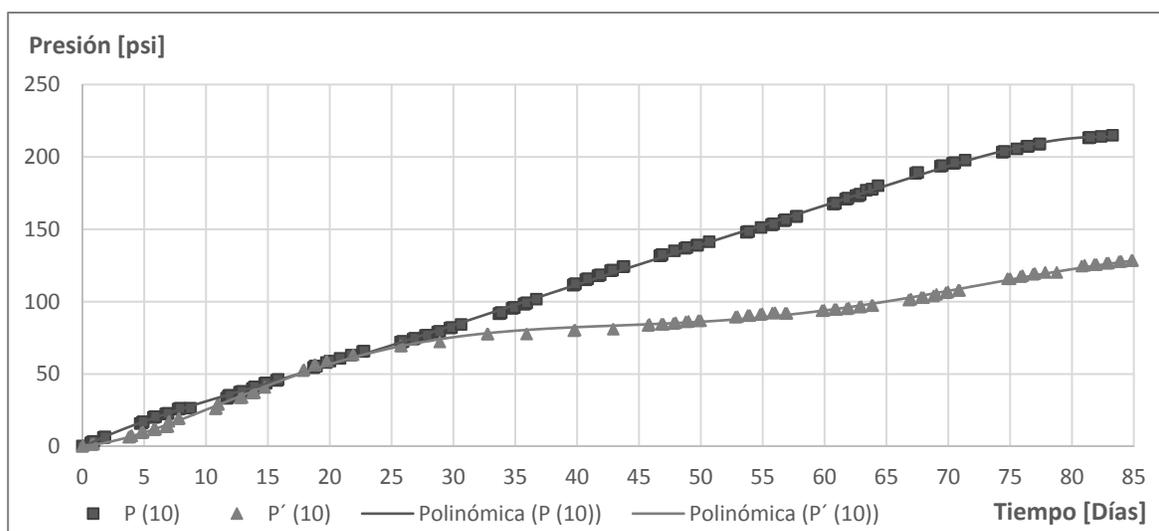


**Gráfica 7.22.- Presiones acumulativas alcanzadas por las excretas de conejo.**



La grafica 7.23 presenta la comparativa del biodigestor 10 para ambas pruebas, el cual contuvo excremento de conejo a proporción de 1:1, en donde se aprecia que en ambas pruebas se tiene un inicio prácticamente idéntico hasta el día 25, a partir de entonces en la segunda prueba se presentó una disminución en la tasa de incremento de presión debido la bajas condiciones de temperatura en la que estuvo presente este biodigestor.

**Gráfica 7.23.- Comparativa entre mezclas 1:1 de excremento de conejo.**

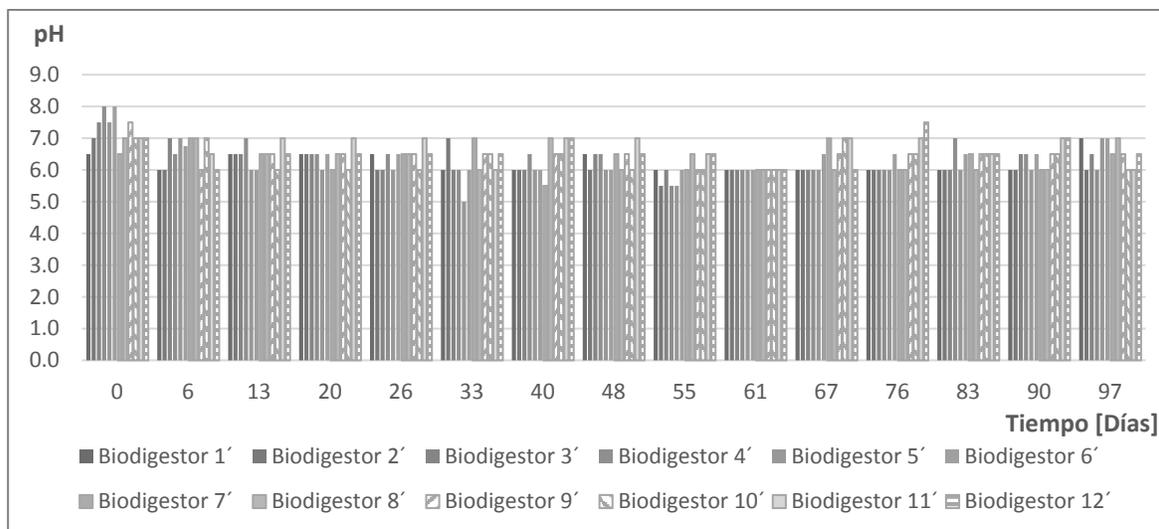


La variación de pH de los 12 biodigestores con respecto al tiempo se presenta en la gráfica 7.24, en donde observamos que al igual que en la primera prueba, existe una ligera acidificación de las mezclas conforme avanza el proceso, aunque en la segunda prueba para la mayoría no fue tan significativo como en la prueba anterior. El pH máximo fue de 8.0 y lo tuvieron los biodigestores 4 y 6 con excremento de cabra y borrego, respectivamente, para ambos fue con su pH inicial; el pH mínimo fue de 5.5 atribuido a los biodigestores 2, 4 y 7, con excrementos de caballo, cabra y vaca, respectivamente, este valor lo alcanzaron a los 55 días de transcurrida la prueba, después de esto el pH ascendió ligeramente para mantenerse entre 6 y 6.5, este es el valor de pH promedio para la mayoría de los biodigestores.

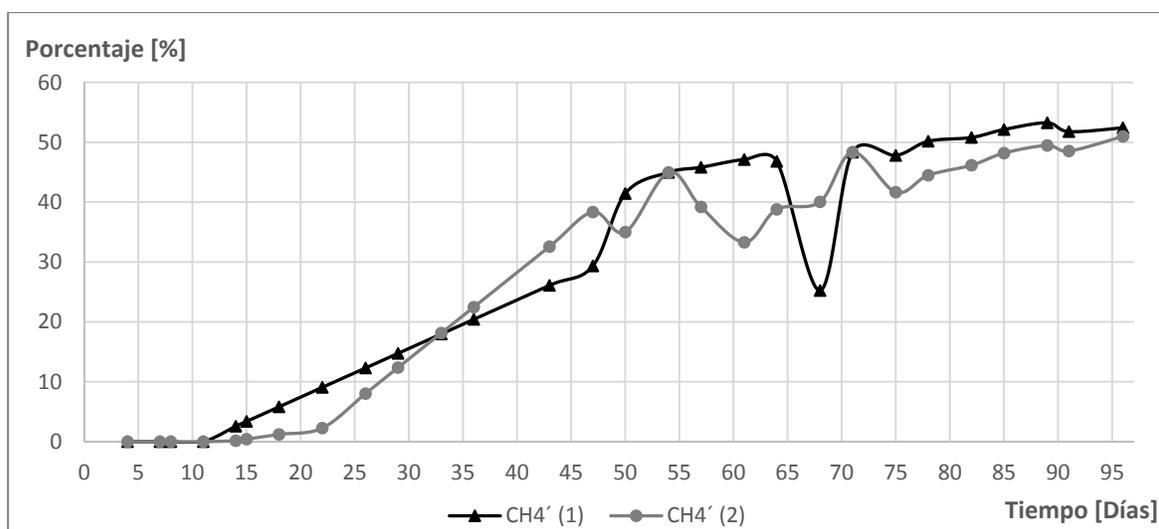
En la gráfica 7.25 se muestra la variación de metano ( $\text{CH}_4$ ) para los biodigestores 1 y 2 con excremento de caballo, en donde vemos que el biogás generado en ambos biodigestores fue lineal en los primeros 45 días, para el biodigestor 2, en los días 50, 61 y 75 se presentan bajas en la concentración de metano, debido a la entrada de oxígeno al biodigestor por las pruebas realizadas con el analizador. El biodigestor 1 también presenta una disminución considerable en la concentración de metano en el día 68, también causada por la presencia de oxígeno dentro del biodigestor. Los valores

máximos de metano son 53.25% para el biodigestor 1 y 50.99% para el biodigestor 2, a pesar de su bajo incremento de presión, su porcentaje de metano del biogás generado es alto aunque aún debajo del promedio de contenido de metano presente en el biogás que es de entre 60 y 70%.

**Gráfica 7.24.- pH de los 12 biodigestores en la segunda prueba.**

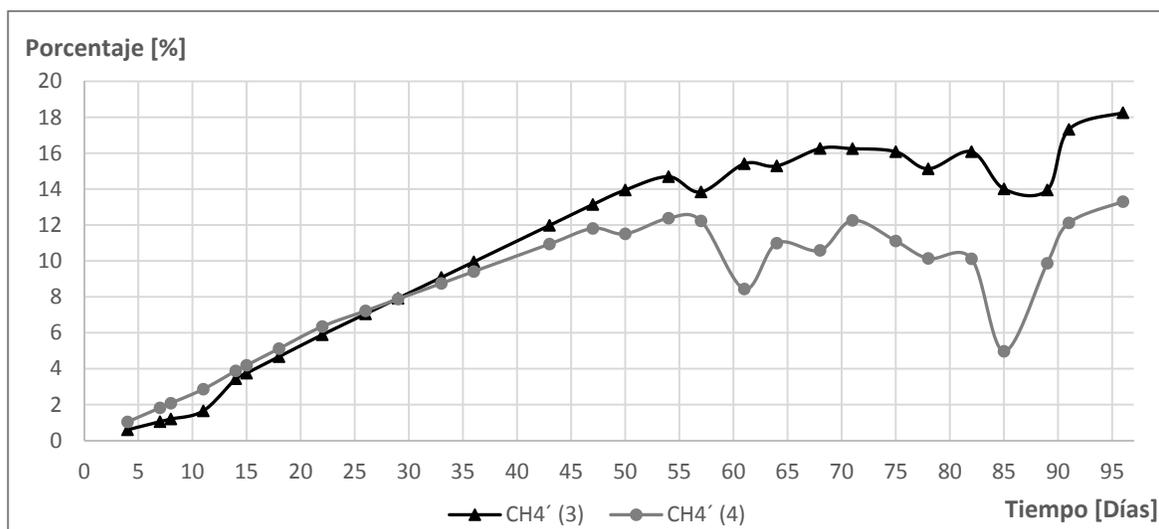


**Gráfica 7.25.- Porcentaje de metano generado por los excrementos de caballo.**



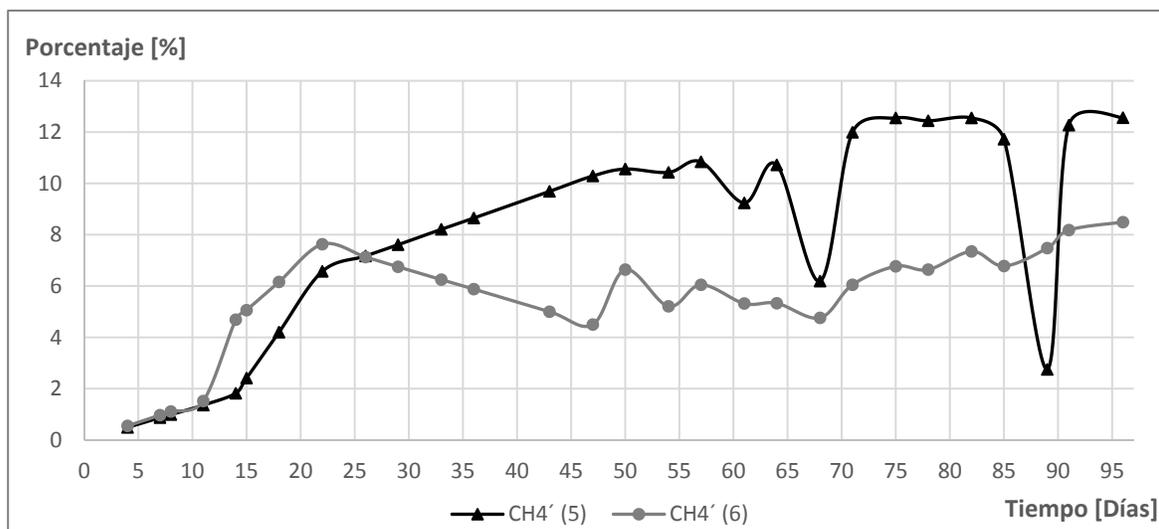
En la gráfica 7.26, se presenta el porcentaje de metano para los biodigestores con excretas de cabra, en donde se aprecia que el porcentaje de metano del biogás generado es muy bajo teniendo como máximo 18.25% para el biodigestor 3 y 13.30% en el biodigestor 4. Al igual que en los biodigestores 1 y 2 con excretas de caballo, se presentan caídas en el porcentaje de metano debido al ingreso de oxígeno en el recipiente durante las pruebas con el analizador de gases. La baja producción de metano indica una inhibición del proceso durante la etapa metanogénica, dada las bajas condiciones de temperatura. Para estas dos mezclas la proporción 1:1 presento un mejor porcentaje de metano que la mezcla 1:2, aunque muy por debajo de lo que se esperaría.

**Gráfica 7.26.- Porcentaje de metano generado por los excrementos de cabra.**



En la gráfica 7.27 del porcentaje de metano para los excrementos de borrego, se tiene una muy baja concentración de metano en ambos biodigestores alcanzando apenas máximos de 12.56% y 8.49% para los biodigestores 5 y 6 respectivamente, como se aprecia también existen caídas en el porcentaje de metano en ambos biodigestores por la presencia de oxígeno dentro de estos.

**Gráfica 7.27.- Porcentaje de metano generado por los excrementos de borrego.**

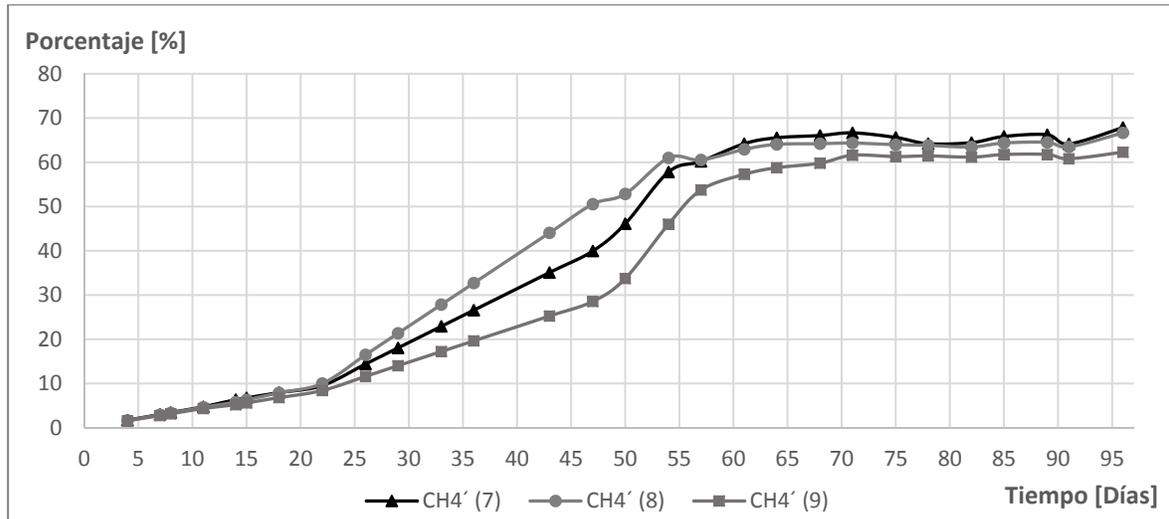


Los biodigestores 7, 8 y 9 con mezclas 1:1, 1:2 y 1:3 respectivamente, todos con excremento de ganado vacuno, presentan un excelente porcentaje de metano que se estabiliza a partir de los 60 días y hasta el final de la prueba, como se muestra en la gráfica 7.28, los tres presentan un porcentaje máximo mayor al 60%, el biodigestor 7 presento un porcentaje máximo de metano de 67.85%, en el biodigestor 8 fue de 66.66% y para el biodigestor 9 el porcentaje máximo fue de 62.29%. El biodigestor 7 es el que presenta el porcentaje más alto de las tres mezclas, si comparamos el porcentaje de metano del biodigestor 7 en la primera prueba con el de la segunda prueba, ambos con excremento de vaca en proporción 1:1, se observa que el porcentaje en la segunda prueba es mayor, lo que indica que a menor temperatura se tiene un ligero aumento en el porcentaje de metano generado dentro del biogás.

En la gráfica 7.29, se observa la variación del porcentaje de metano para los tres biodigestores con excremento de conejo, los tres alcanzaron más del 50% pasados los 20 días y los biodigestores 10 y 11 superaron el 60% a partir de los 40 días, el biodigestor 12 supero el 60% pasados los 60 días, los valores máximos alcanzados durante esta segunda prueba fueron de 75.87% en el biodigestor 10, 77.22% para el biodigestor 11 y 72.15% para el biodigestor 12. El biodigestor 10 alcanzó su máximo a los 70 días, y el

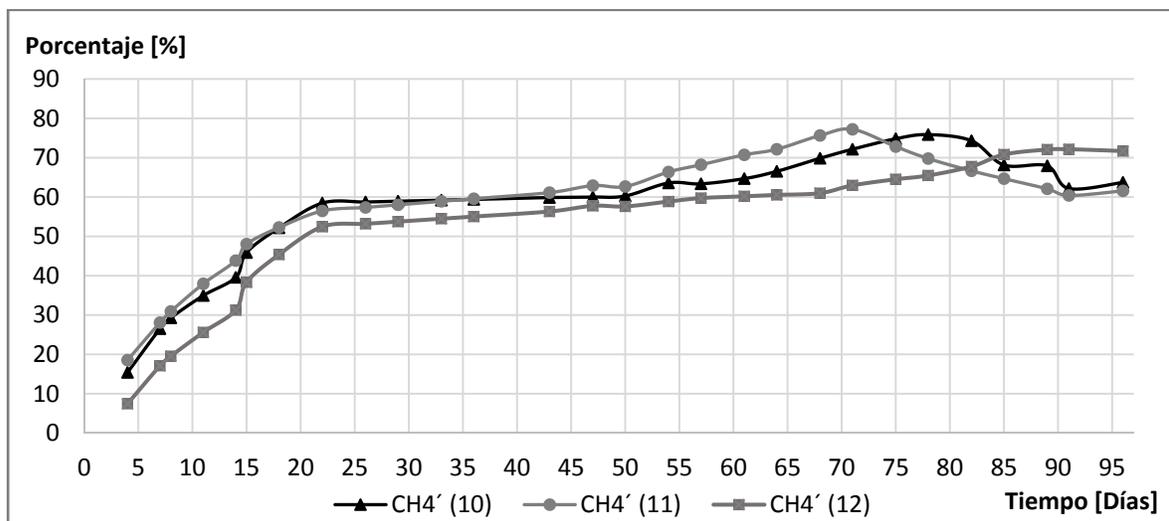
biodigestor 11 lo alcanzo a los 78 días, posteriormente comenzó a decaer hasta el final de la prueba. El biodigestor 11 con mezcla 1:2 tuvo el porcentaje más alto de entre todos los biodigestores, incluyendo los de la primera prueba.

**Gráfica 7.28.- Porcentaje de metano generado por los excrementos de vaca.**



Comparando el porcentaje presente en el biogás generado en el biodigestor 10 de la primera (72%) y segunda prueba (75.87%), ambos con excremento de conejo a proporción 1:1, observamos que el porcentaje de metano fue mayor en la segunda prueba, probablemente esto se deba a la menor temperatura en la primera prueba.

**Gráfica 7.29.- Porcentaje de metano generado por los excrementos de conejo.**



Para el cálculo de volumen de biogás generado durante los 96 días de la segunda prueba, para los biodigestores del 7 al 12 con excrementos de vaca y conejo; puesto que estos son los que mayor incremento de presión presentaron durante las pruebas, en comparación con los biodigestores del 1 al 6; se requirió de datos puntuales como lo son: presión en el interior del reactor ( $P_n$ ), Presión atmosférica ( $P_{atm}$ ), temperatura en el interior del reactor ( $T_n$ ), constante universal de los gases ideales ( $R$ ), peso molecular del metano, peso molecular de dióxido de carbono, porcentaje de metano (%) y porcentaje dióxido de carbono (%). El subíndice “n” indica el número de biodigestor.

Antes de continuar con el cálculo de volumen es necesario indicar que para cuestiones de cálculo, se consideró despreciable la cantidad de oxígeno y ácido sulfhídrico debido a su insignificante presencia en el contenido de biogás, quedando así, como elementos base del biogás, metano ( $CH_4$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y se considera el 100% de la mezcla de biogás la suma de ambos componentes.

Se utilizará una muestra de los datos adquiridos el día 71 del biodigestor 7 (Vaca, Mezcla 1:1) para ejemplificar el cálculo de volumen generado desde el día 68 hasta esa fecha.

El día 71 de actividad, el biodigestor 7 presentaba las siguientes lecturas:

$$P_7 = 2.875 \text{ psi} = 2.875 \text{ psi} \left( \frac{6894.76 \text{ Pa}}{1 \text{ psi}} \right) = 19822.435 \text{ Pa}$$

$$T_7 = 18.6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Con la ayuda del analizador de gases MADUR, se detectó:

$$\%CH_4 = 65.99 \%$$

$$\%CO_2 = 34.01 \%$$

Después de la obtención de la composición del biogás con el analizador de gases, se registró un remante de presión:

$$P_{restante} = 1.155 \text{ psi} = 7963.448 \text{ Pa}$$

Hay que indicar que justo tres días antes del día 71 se realizó una prueba con el analizador de gases, al finalizar esta prueba se registró una presión de 1.3 psi, entonces el incremento de presión desde el día 68 al día 71 sería de 1.575 psi, por lo tanto para conocer la producción real de biogás durante estos tres días se tendrá que calcular la cantidad de biogás el día 71 menos la cantidad de biogás que permaneció en el biodigestor a final de la anterior prueba.

Una vez recopilados los datos que caracterizaban el biogás en ese instante, se puede comenzar con el cálculo del volumen generado en ese instante.

Con los datos obtenidos se pudo calcular la masa de biogás alojada en el interior del reactor mediante la ecuación 1.10 de estado de los gases ideales expuesta en el capítulo uno:

$$PV = mRpT$$

Para determinar la “ $R_p$ ” del biogás es necesario recurrir a la ecuación 1.8 también del capítulo 1, en donde “ $R_u$ ” es la constante universal de los gases ideales con un valor de 8.314 [Nm/(mol – K)] y “ $M$ ” es la masa molar del Biogás.

$$R_p = \frac{R_u}{M}$$

Cuando se trata con una mezcla de gases, la masa molar de la mezcla será entonces, la suma de las masas molares de cada uno de los gases que compongan la mezcla. En este caso, se tiene una mezcla de gases, cuyos componentes son 65.99% de metano (CH<sub>4</sub>) y

34.01% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Se sabe que el peso molecular del metano es de 16.04 gr/mol, o bien, 0.016 kg/mol y el peso molecular del dióxido de carbono es de 44.01 gr/mol, o bien 0.044 kg/mol. Entonces, la masa molar quedara definida de la siguiente manera por la ecuación 7.1:

$$M = M_{CH_4} + M_{CO_2} \quad (\text{Ecuación 7.1})$$

$$M = M_{CH_4} + M_{CO_2} = 0.66 \left( 0.016 \frac{kg}{mol} \right) + 0.3401 \left( 0.044 \frac{kg}{mol} \right)$$

$$M = 25.553 \times 10^{-3} \frac{kg}{mol}$$

Con la masa molar del biogás al interior del biodigestor, se calcula la constante particular para el biogás obtenido durante esta prueba, sustituyendo los valores en la ecuación 1.8.

$$R_p = \frac{R_u}{M} = \frac{8.314 \frac{Nm}{mol-K}}{25.553 \times 10^{-3} \frac{kg}{mol}} = 325.381 \frac{Nm}{kg-K}$$

Ya conocida la constante particular que caracteriza al biogás, podemos determinar el volumen específico de gas al interior del biodigestor, mediante la ecuación 1.10 de gases ideales. Es importante recordar que las magnitudes de presión y temperatura deben de expresarse en forma absoluta, es decir, en el caso de presión, es indispensable sumar la presión manométrica y atmosférica para obtener la presión absoluta, se consideró una presión atmosférica de 101.325 Pa, y a su vez, la temperatura debe de estar expresada en una escala absoluta, para este caso, en escala Kelvin.

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{man} = 101.325 Pa + 19822.435 Pa = 19923.76 Pa$$

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273 = 18.6^{\circ}C + 273 = 291.6 K$$

Para calcular el volumen específico del gas se despejó “V/m” de la ecuación 1.10 y se obtuvo la ecuación 7.2:

$$PV = mR_pT$$

$$\frac{V}{m} = \frac{R_pT}{P} \quad \text{(Ecuación 7.2)}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 7.2 se obtiene:

$$\frac{V}{m} = \frac{\left(325.381 \frac{Nm}{kg \cdot K}\right) (291.6 K)}{19923.76 Pa}$$

$$\frac{V}{m} = 4.762 \frac{m^3}{kg}$$

Dentro del biodigestor se consideró un espacio libre de 23 litros, puesto que el volumen total del recipiente es de 33 litros, menos 10 litros ocupados por el sustrato, el espacio libre es ocupado por el biogás generado, por lo tanto se calculó la masa dentro del reactor. Considerando que el volumen específico es el inverso de la densidad y que la densidad es masa entre volumen como se muestra en la ecuación 7.3, se tiene:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{(Ecuación 7.3)}$$

$$\rho = \frac{1}{\frac{V}{m}} = \frac{1}{4.762 \frac{m^3}{kg}} = 209.986 \times 10^{-3} \frac{kg}{m^3}$$

Con la densidad y el volumen que ocupa el biogás dentro del biodigestor se calculó calcular su masa, despejando “m” de la ecuación 7.3 para obtener la ecuación 7.4.

$$\rho = \frac{m}{V} \therefore m = \rho \cdot V \quad \text{(Ecuación 7.4)}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 7.4 se obtiene:

$$m = \rho \cdot V = 209.986 \times 10^{-3} \frac{kg}{m^3} \left( \frac{23lt}{1000 \frac{lt}{m^3}} \right) = 4.83 \times 10^{-3} kg$$

En este caso, el volumen de control para el biogás siempre estará restringido a los 23 litros de espacio libre dentro del biodigestor, razón por la cual tanto presión como temperatura estarán en constante cambio si lo comparamos con la presión atmosférica y la temperatura ambiente. En condiciones normales, es decir, a presión atmosférica, el biogás presenta una densidad cercana a  $1.25 \text{ kg/m}^3$ , si se extrajera el biogás del interior del reactor y se manipuláa a una presión atmosférica se podría contabilizar el volumen de biogás producido en el reactor.

Considerando una densidad  $1.25 \text{ kg/m}^3$  y una masa de  $0.00483 \text{ kg}$ :

$$\rho = \frac{m}{V} \therefore V = \frac{m}{\rho} = \frac{4.83 \times 10^{-3} kg}{1.25 \frac{kg}{m^3}} = 3.864 \times 10^{-3} m^3 = 3.864 \text{ litros}$$

Como se mencionó anteriormente para conocer la producción real se debe de considerar el remanente de biogás de la prueba anterior. Realizando el mismo cálculo hasta ahora desarrollado para el remanente de presión del día 68 se obtiene que había un volumen de 1.745 litros 3 días antes de la prueba que se analizó anterior mente. Por lo tanto la generación de biogás en esos tres días fue de:

$$V_{generado} = V - V_{remanente} = 3.864 \text{ lt} - 1.745 \text{ lt}$$

$$V_{generado} = 2.119 \text{ litros}$$

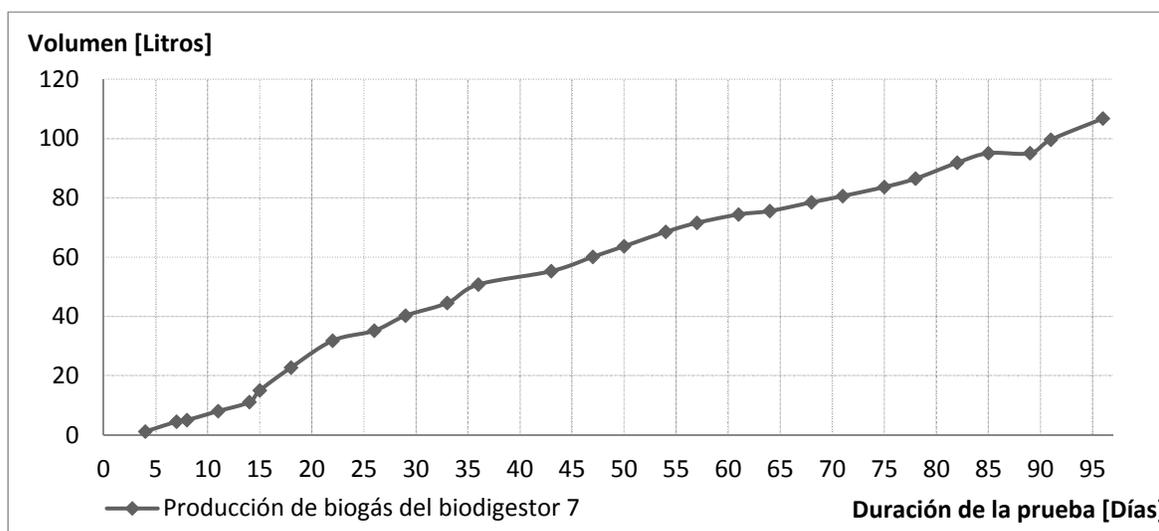
Por lo tanto, en 3 días se generó 2.119 litros de biogás en el interior del biodigestor 7 cuyo sustrato era excremento de vaca, a proporción de 1:1 con el agua.

Este procedimiento se aplicó a los biodigestores 7 al 12 apoyándose de una tabla de Excel, donde se ingresaron todos los datos involucrados con el modelo matemático, con la finalidad de agilizar el cálculo.

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los biodigestores de vaca y conejo se presentan en las gráficas 7.30 a la 7.35.

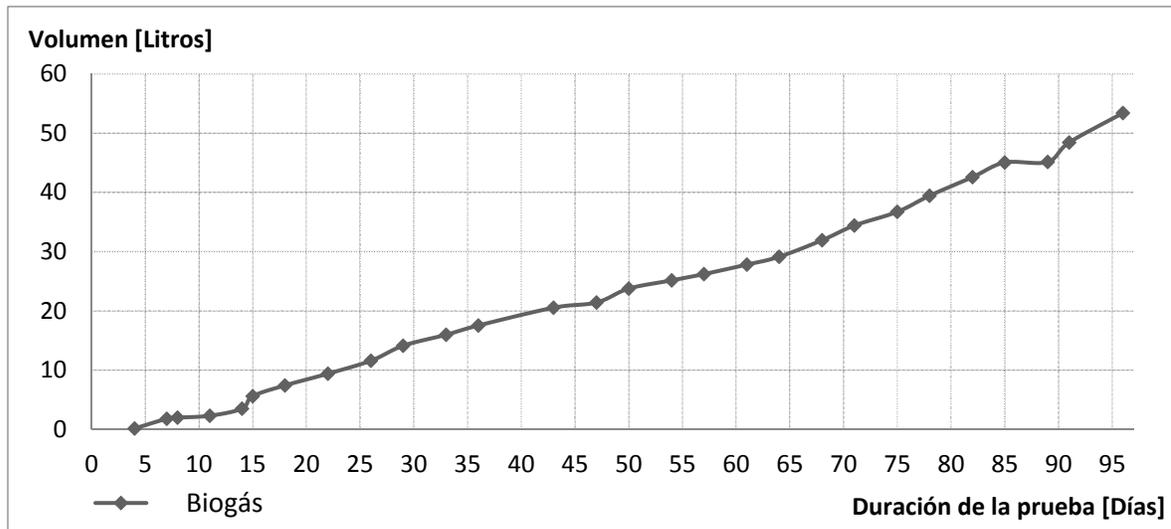
El biodigestor 7 con excremento de vaca a una concentración 1:1 alcanzó una producción de 107.766 litros de biogás en los 96 días que duró la prueba, como se aprecia en la gráfica 7.30, de este modo se obtuvo una producción promedio de 1.112 litros de biogás por día.

**Gráfica 7.30. Producción de biogás en el biodigestor 7.**



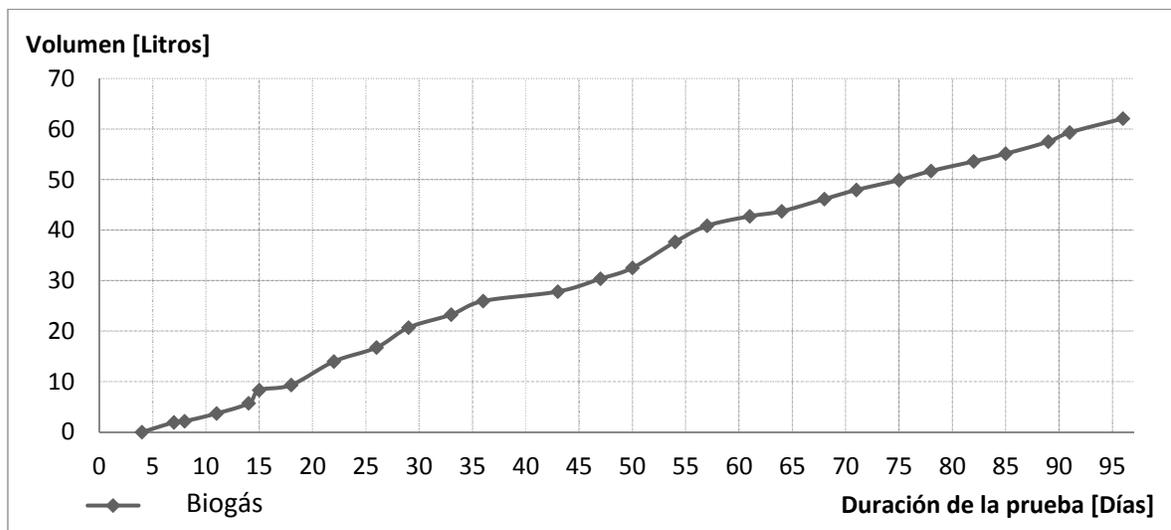
En la gráfica 7.31 se muestra la producción de biogás del biodigestor 8 que contenía una mezcla 1:2 de excremento de vaca y agua. Este biodigestor presentó una producción de biogás 53.383 litros en 96 días, con un promedio de 0.556 litros por día, se observa, que se generó en promedio apenas la mitad de lo que se obtuvo con el biodigestor 7 por día.

**Grafica 7.31. Producción de biogás en el biodigestor 8.**



La producción de biogás del biodigestor 9 se observa en la gráfica 7.32, este reactor contenía excremento de vaca a una mezcla de 1:3. Durante 96 días de prueba alcanzo una producción de biogás de 62.096 litros, lo cual da un promedio de 0.646 litros de biogás por día. La producción diaria de este biodigestor estuvo apenas por encima del biodigestor 8 pero muy debajo del biodigestor 7.

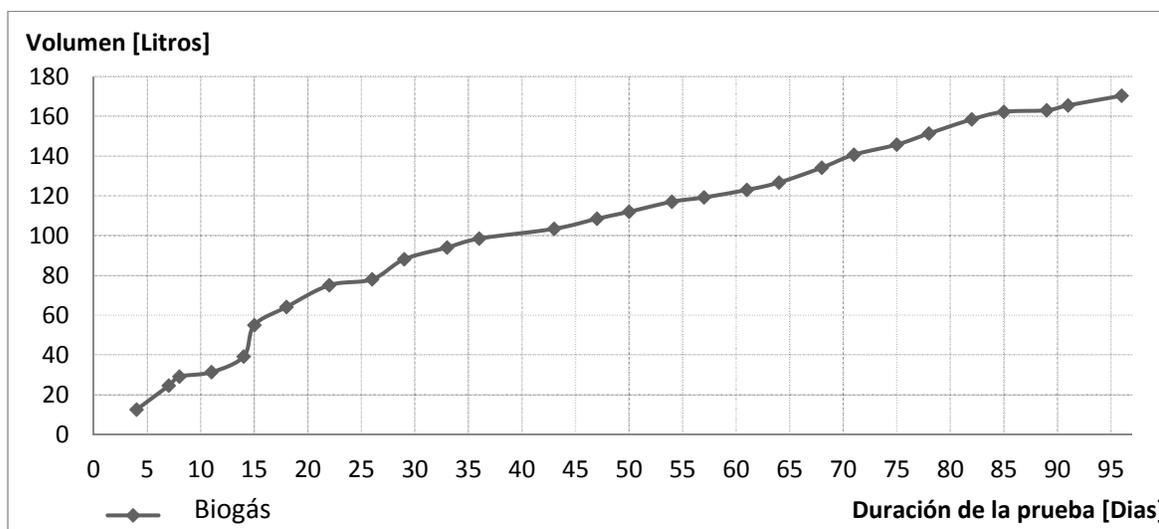
**Grafica 7.32. Producción de biogás en el biodigestor 9.**



En cuanto a los biodigestores que utilizaron excremento de vaca como materia orgánica tuvieron una producción aceptable de biogás con valores promedio que van desde 0.5 hasta 1.1 litros por día. El porcentaje de metano en la mezcla llegó a tener valores comprendidos entre el 50-65%, este porcentaje se presentó a partir del día 50 y hasta el día 96 de prueba, razón por la cual, el tiempo de retención hidráulica debe de estar comprendido entre estos días. También se puede afirmar que la mezcla 1:1 dentro del biodigestor 7 fue la que demostró tener mejor capacidad de generación de biogás duplicando prácticamente los valores obtenidos con las mezclas 1:2 y 1:3, aunque se debe considerar que contenía una mayor cantidad de estiércol comparado con los otros biodigestores.

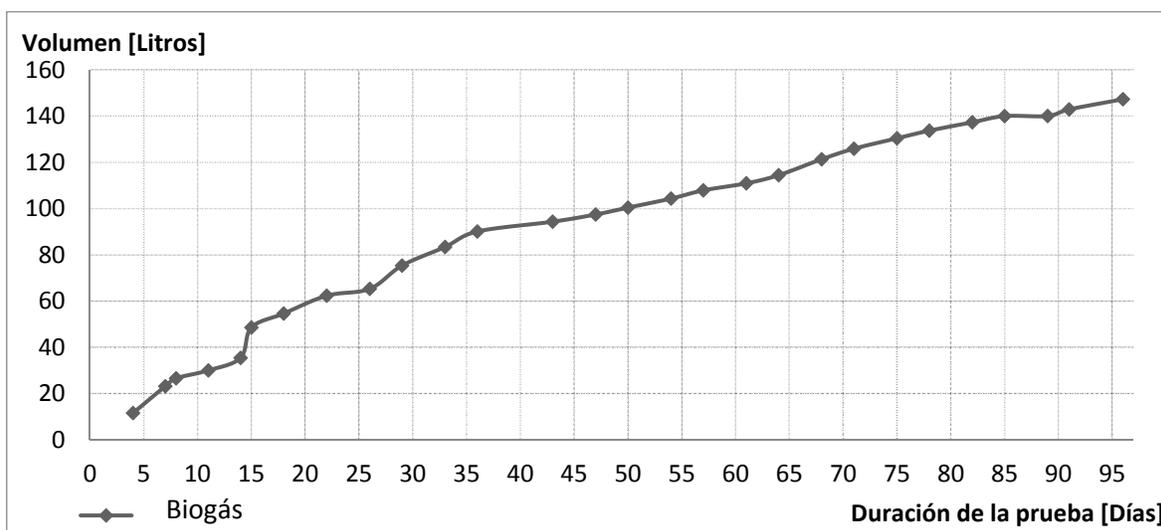
Los biodigestores 10 al 12 contenían excremento de conejo como materia orgánica. El biodigestor 10, que presentaba una dilución 1:1, registró una producción de biogás de 170.34 litros en 96 días, dando un promedio de 1.77 litros de biogás por día como se ve en la gráfica 7.33. Presentando una generación por día superior a la del biodigestor 7 que contenía excremento de vaca.

**Gráfica 7.33. Producción de biogás en el biodigestor 10.**



El biodigestor 11 fue asignado con una disolución 1:2, la cual, presento una producción de biogás de 147.33 litros en 96 días como lo demuestra la gráfica 7.34, lo cual representa una producción de biogás promedio de 1.534 litros de biogás por día, producción inferior al biodigestor 10, pero superior a cualquier de los tres biodigestores con excremento de vaca.

**Gráfica 7.34. Producción de biogás del biodigestor 11.**

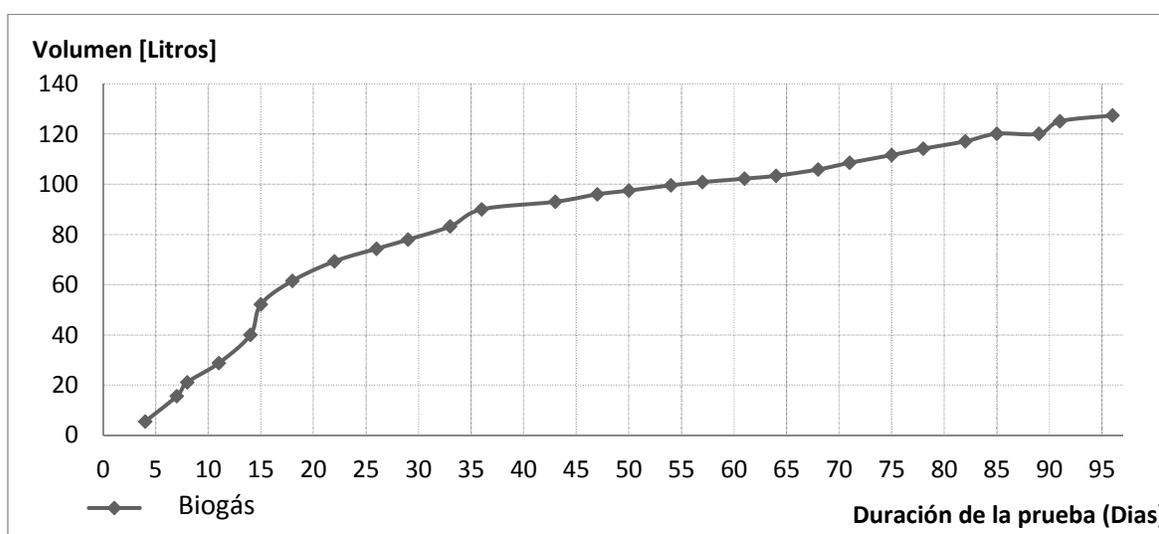


En la gráfica 7.35 se muestra la producción de biogás del biodigestor 12, el cual contenía una mezcla 1:3, alcanzando 127.474 litros en 96 días, en promedio 1.3278 litros diarios de biogás generados. Mostrando una generación promedio diaria menor que la de los biodigestores 10 y 11 que también contenían excremento de conejo.

Los biodigestores que utilizaron excremento de conejo como materia orgánica, obtuvieron una mejor producción de biogás y mejor generación de CH<sub>4</sub>, en comparación con todas las demás materia orgánicas utilizadas, además de que el proceso de degradación fue más rápido y duradero que los biodigestores que utilizaron excremento de vaca como materia orgánica. De igual forma su comportamiento fue más estable y presentaron una mayor resistencia al cambio brusco de temperatura durante su etapa

metanogénica. Si hacemos una comparación entre los 3 biodigestores con excremento de conejo, podemos decir que la mezcla con mejor rendimiento fue la 1:1 del biodigestor 10, la cual presentó una mayor producción de biogás. En conclusión, los biodigestores a base de excremento de conejo lograron una mejor producción de biogás que los biodigestores de vaca, alcanzaron porcentajes de CH<sub>4</sub> más altos y el tiempo de degradación de materia orgánica fue menor y resultaron ser más resistentes a los cambios bruscos de temperatura.

**Grafica 7.35. Producción de biogás del biodigestor 12.**



La producción en litros de los biodigestores 1 al 6 durante toda la prueba fueron de 21.6, 34.1, 17.3, 28.7, 19.6 y 9.3 litros respectivamente. Como observamos el que produjo más biogás de estos 6 sustratos fue el biodigestor 2 con excremento de caballo y agua a proporción de 1:2.

De las dos pruebas realizadas durante la elaboración de este proyecto, podemos destacar que los excrementos de conejo otorgan una excelente producción de biogás con excelente porcentaje de metano, superando el 70% de metano. Los excrementos de vaca también tienen una buena producción de biogás en todas las mezclas. La producción de biogás está en función de la cantidad de materia orgánica introducida en el reactor, es decir, un

biodigestor que contenga más materia orgánica que otro obtendrán una mayor cantidad de biogás que de otro con menor contenido de materia orgánica, a pesar de esto las mezclas con mayor dilución deben presentar una mayor productividad al obtenerse de ellas una mayor cantidad de biogás por kg de estiércol. En la figura 7.2 se observa cómo se realizaron las pruebas utilizando el analizador de gases a uno de los biodigestores.



**Figura 7.2.- Pruebas realizadas con el analizador de gases.**

Las temperaturas en ambas pruebas presentan un comportamiento en función a la temperatura ambiente y no existen diferencias considerables entre mezcla y tipos de materia orgánica, denotando que a mayor temperatura el proceso es más rápido en comparación con menores temperaturas, también analizando los biodigestores 7 y 10 en ambas pruebas, se observó que a menor temperatura el porcentaje de metano tiende a ser ligeramente mayor a pesar de esto el tiempo de degradación se alarga y la producción de biogás es menor a bajas temperaturas. Los doce biodigestores durante las pruebas se pueden observar en la figura 4.3.



**Figura 7.3.- Biodigestores colocados en el laboratorio.**

El pH en base a ambas pruebas se puede decir que en todos los biodigestores y mezclas, tiende a acidificarse conforme avanza el proceso, los excrementos presentan una menor acidificación que otras materias orgánicas como los desechos de comida o desechos de poda de pastos. En la figura 7.4 se muestra la toma de una muestra para la prueba de pH.



**Figura 7.4.- Realización de pruebas de pH.**

Con los datos de producción de biogás, se determinó la cantidad de biogás generada por kilogramo de MV de los 12 biodigestores para ello utilizamos los datos de la tabla 7.3, resultado de la combinación de diferentes fuentes.

**Tabla 7.3.- Densidad, porcentaje de masa seca y masa volátil de diferentes biomásas.**

SUSTRATO	Densidad “ $\rho$ ” [kg/m <sup>3</sup> ]	MS (%)	MV (%)
Estiércol de Vacas lecheras	994	25	83
Estiércol de conejos	750	39	77
Estiércol de caballo	800	20	86
Estiércol de cabra	800	18	86
Estiércol de borrego	800	16	86

Fuentes: Aqualimpia Engineering. Iowa State University. Buxadé, Carlos; Zootecnia tomo IV, bases de producción animal. Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas.

Para ejemplificar el cálculo de los litros de biogás al día por kilogramo de masa volátil, tomaremos las proporciones 1:3 para vacas y conejos.

Para el biodigestor 9, excremento de vaca a proporción 1:3, tenemos, 7.5 litros de agua y 2.5 litros de estiércol de vaca. Si sabemos que la densidad del estiércol de vaca es de 994 kg/m<sup>3</sup>, se puede determinar la masa de estiércol contenida en el biodigestor 9:

$$m = \rho \cdot V = \left(994 \frac{kg}{m^3}\right) (5 \text{ litros}) \left(\frac{1 m^3}{1000 \text{ litros}}\right) = 2.485 \text{ kg}$$

Por lo tanto, el biodigestor 9 almacenaba 2.485 kg de estiércol, de los cuales, el 25% lo compone la masa seca (MS), es decir, la cantidad de estiércol libre de humedad.

$$MS = 0.25(2.485 \text{ kg}) = 0.621 \text{ kg de masa seca}$$

De esa cantidad de masa seca, el 83% corresponde a masa volátil (MV), es decir, la materia que realmente genera metano.

$$MV = 0.83(0.621 \text{ kg}) = 0.516 \text{ kg de masa volatil}$$

Por lo tanto, en el caso del estiércol de vaca que se recolectó en la FES Cuautitlán, se puede decir mediante la gráfica 7.32, que se produjeron 62.096 litros de biogás en 96 días, divididos entre la masa volátil del biodigestor 7, calculado anteriormente, da como resultado la producción de 120.435 litros de biogás por cada kilogramo de masa volátil en 96 días, en promedio 1.254 litros diarios de biogás por kilogramo de masa volátil.

Para el biodigestor 12 con excremento de conejo a proporción 1:3 se tienen 7.5 litros de agua y 2.5 litros de excremento de conejo. Sabiendo que la densidad del estiércol de conejo es aproximadamente  $750 \text{ kg/m}^3$ , se puede determinar la masa de estiércol contenida en el biodigestor 12:

$$m = \left(750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (2.5 \text{ litros}) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ litros}}\right) = 1.875 \text{ kg}$$

Por lo tanto, el biodigestor 12 almacenaba 1.875 kg de estiércol de conejo, de los cuales, el 39% lo compone la masa seca (MS).

$$MS = 0.39(3.75 \text{ kg}) = 0.731 \text{ kg de masa seca}$$

De esa cantidad de masa seca, el 77% corresponde a masa volátil (MV).

$$MV = 0.77(0.7313 \text{ kg}) = 0.563 \text{ kg de masa volátil}$$

Combinando estos datos y con los resultados obtenidos de la prueba del biodigestor 12 expuestos en la gráfica 7.35, se puede determinar al igual como se realizó para el biodigestor 9 que, con 0.563 kg de masa volátil se pudo producir 127.474 litros de biogás en 96 días, esto da un promedio de 226.394 litros por kilogramo de masa volátil en los 96 días, lo que representa, 2.358 litros de biogás diarios por kilogramo de masa volátil.

Realizando este mismo procedimiento para los demás biodigestores se tienen los resultados mostrados en la tabla 7.4, además, se incluye el porcentaje máximo de CH<sub>4</sub> alcanzado durante la prueba.

**Tabla 7.4.- Producción de litros de biogás por kilogramo de masa volátil y por kilogramo de estiércol al día de los doce biodigestores.**

No. De Biodigestor	Tipo de estiércol y proporción materia orgánica agua	Kg de estiércol dentro de cada biodigestor	Kg de MV dentro de cada biodigestor	Litros de biogás al día por Kg de MV	Litros de biogás al día por Kg de estiércol	Porcentaje Máximo de CH <sub>4</sub> alcanzado durante los 96 días de prueba
1	Caballo a 1:1	4.000	0.688	0.327	0.056	53.250
2	Caballo 1:2	2.667	0.459	0.774	0.133	50.990
3	Cabra a 1:1	4.000	0.619	0.290	0.045	18.250
4	Cabra a 1:2	2.667	0.413	0.724	0.112	13.300
5	Borrego a 1:1	4.000	0.550	0.371	0.051	12.560
6	Borrego a 1:2	2.667	0.367	0.263	0.036	8.490
7	Vaca a 1:1	4.970	1.031	1.078	0.224	67.850
8	Vaca a 1:2	3.313	0.688	0.809	0.168	66.660
9	Vaca a 1:3	2.485	0.516	1.254	0.260	62.290
10	Conejo a 1:1	3.750	1.126	1.576	0.473	75.870
11	Conejo a 1:2	2.500	0.750	2.044	0.614	77.220
12	Conejo a 1:3	1.875	0.563	2.358	0.708	72.150

## 7.1. DIMENSIONAMIENTO DE DOS BIODIGESTORES PARA LA FES CUAUTITLÁN.

En la FES Cuautitlán se cuenta con diferentes tipos de ganado, el número de animales por cada tipo de ganado se muestra en la tabla 7.5.

**Tabla 7.5.- Población de ganado en la FES Cuautitlán.**

ANIMAL	CANTIDAD
Equinos	25
Cabras	64
Borregos	69
Vacas	100
Conejos	3300

Para el cálculo de dimensionamiento de los biodigestores propuestos para la FES Cuautitlán, se tomó como base los resultados obtenidos por los biodigestores de vaca y conejo, los cuales, fueron los que presentaron mayor generación de biogás, es decir, el biodigestor 9 para vacas y el biodigestor 12 para conejos.

De acuerdo a estudios de campo realizados por la Universidad del Estado de Iowa (Iowa State University) en el año de 1985, se puede estimar que una vaca de 450 kg puede excretar en promedio 37.2 kg de materia orgánica, del cual, 70% corresponde a estiércol.

Puesto que como se mencionó anteriormente una vaca excreta en promedio 37.2 kg de materia orgánica, de los cuales el 70 % es estiércol, se tiene que:

$$37.2kg(0.7) = 26.39kg$$

Entonces de los 37.2 kg de excretas de vaca, 26.39 kg son de estiércol. Actualmente la FES Cuautitlán cuenta con una población de 100 vacas. Si tomamos en cuenta que cada vaca, en promedio genera 26.39 kg/día de estiércol, podemos estimar que en un día se acumula en total, 2639 kg/día de estiércol. Para fines de dimensionamiento del biodigestor, se tomó en cuenta una producción de 2000 kg/día de estiércol. En términos de volumen por día se tiene:

$$V_E = \frac{m}{\rho} = \frac{\left(2000 \frac{kg}{día}\right)}{\left(994 \frac{kg}{m^3}\right)} = 2.012 \frac{m^3}{día}$$

Tomando los datos anteriormente expuestos del porcentaje de MS y MV se puede calcular la MS y MV de la cantidad de estiércol que se propone para el biodigestor:

Masa seca (MS) en kg:

$$MS(kg) = 0.25(2000kg) = 500 kg$$

Masa seca (MS) en m<sup>3</sup>:

$$MS(m^3) = 0.25(2.012m^3) = 0.503 m^3$$

Masa volátil (MV) en kg:

$$MV(kg) = 0.83(500 kg) = 415 kg$$

Masa volátil (MV) en m<sup>3</sup>:

$$MV(m^3) = 0.83(0.5030175 m^3) = 0.418 m^3$$

Se estima que los biodigestores continuos requieren mezclas con una proporción de solidos del 10% del total de la mezcla. Porcentaje de dilución (D)= 10 % (90 % Agua). Por lo tanto el afluente requerido será:

$$Q_a = \frac{MS}{D} = \frac{0.503 \text{ m}^3}{0.1} = 5.030 \text{ m}^3$$

El Volumen de Agua necesario para la mezcla será de:

$$V_{H_2O} = Q_a - V_E = 5.030 \text{ m}^3 - 2.012 \text{ m}^3 = 3.018 \text{ m}^3$$

Con estos cálculos se puede decir que, el volumen útil que entrará en el biodigestor diariamente será de  $5.030 \text{ m}^3$ , por lo tanto el tanque de alimentación deberá poder contener al menos esta cantidad para ser ingresada al biodigestor. Se debe estimar un borde libre en el tanque de mínimo 0.3 m.

En el caso de los biodigestores que contenían excremento de vaca se detectaron valores de metano comprendidos del 50-65% de la mezcla de biogás, después de 50 días de fermentación anaerobia y hasta los 96 días que duró la prueba. Para determinar el tiempo de retención hidráulica (TRH) se debe ser muy cuidadoso, ya que, un lapso corto de fermentación podría ocasionar que no se aproveche todo el potencial de la materia orgánica, por el contrario, si el lapso de fermentación es alto podría ocasionar una inhibición de la producción de metano a falta de alimento de las bacterias metanogénicas. En este caso, se decidió que el tiempo de retención hidráulica óptimo para el proceso sería la media en el lapso en el que se obtuvieron valores por encima del 50% hasta el punto máximo de producción de metano. De acuerdo a los resultados obtenidos del experimento, el tiempo de retención hidráulica sería de 73 días. Para calcular el volumen del digestor ( $V_d$ ) fue necesario relacionar el TRH y el afluente requerido ( $Q_a$ ):

$$V_d = Q_a \cdot TRH = (5.030 \text{ m}^3)(73) = 367.203 \text{ m}^3$$

Una vez que se conoce la MV del estiércol y el volumen del digestor ( $V_d$ ), se puede calcular la carga orgánica volumétrica (COV):

$$COV = \frac{MV}{V_d} = \frac{415 \frac{kgMV}{día}}{367.2028 m^3} = 1.13 \frac{kgMV}{m^3 día}$$

Hasta ahora, se ha calculado el volumen útil del biodigestor, para determinar el volumen total del biodigestor se debe considerar que comprende el volumen útil más el volumen de almacenamiento del biogás, más el volumen de seguridad de 20% del volumen calculado, para poder amortiguar posibles variaciones en la producción de biogás. Dado que la producción de biogás por día para el estiércol de vaca es bajo se considera que el volumen destinado al almacenamiento de biogás debe ser suficiente para contener una producción de biogás de al menos el tiempo de retención hidráulica de esta mezcla, es decir, 73 días.

En base a los resultados obtenidos del estudio realizado con los biodigestores de estiércol de vaca, se ha llegado a la conclusión que, en promedio, 1 kg de masa volátil (MV) de estiércol de ganado vacuno produce 1.254 LBG/día (litros de biogás por día).

De acuerdo al dato anterior la producción de biogás en metro cúbicos por kilogramo de MV al día será de:

$$\left(1.254 \frac{LBG}{kgMV día}\right) \left(\frac{1 m^3}{1000 L}\right) = 1.254 \times 10^{-3} \frac{m^3 BG}{kgMV día}$$

Por lo tanto la producción de biogás diaria (PBD) será de:

$$PBD = \left(1.254 \times 10^{-3} \frac{m^3 BG}{kgMV día}\right) (415 kgMV) = 0.521 \frac{m^3 BG}{día}$$

Haciendo el cálculo de volumen de almacenamiento de biogás durante el tiempo de retención hidráulica:

$$0.5206 \frac{m^3 BG}{día} (73 \text{ días}) = 38.003 m^3$$

Más el 20% de volumen de seguridad:

$$38.0031 m^3 (1.2) = 45.604 m^3$$

Por lo tanto el volumen total del biodigestor para excremento de vaca será de:

$$V_T = 367.203 m^3 + 45.604 m^3 = 412.807 m^3$$

En el caso de conejos, en la FES Cuautitlán se cuenta con una población de 3300 ejemplares, considerando que excretan en promedio 40 gr diarios cada uno, por lo tanto se genera una cantidad de excremento de 132 kg diarios aproximadamente. La densidad del excremento de conejo es de 750 kg/m<sup>3</sup>, por lo tanto, en términos de volumen será:

$$V_E = \frac{m}{\rho} = \frac{\left(132 \frac{kg}{día}\right)}{\left(750 \frac{kg}{m^3}\right)} = 0.176 \frac{m^3}{día}$$

Tomando los datos anteriormente mencionados de MS y MV:

Masa seca (MS) en kg:

$$MS(kg) = 0.39(132 kg) = 51.48 kg$$

Masa seca (MS) en m<sup>3</sup>:

$$MS(m^3) = 0.39(0.176 m^3) = 0.069 m^3$$

Masa volátil (MV) en kg:

$$MV(kg) = 0.77(51.48 \text{ kg}) = 39.64 \text{ kg}$$

Masa volátil (MV) en m<sup>3</sup>:

$$MV(m^3) = 0.77(0.069 \text{ m}^3) = 0.053 \text{ m}^3$$

Se estima que los biodigestores continuos requieren mezclas con una proporción de solidos del 10% del total de la mezcla. Porcentaje de dilución (D)= 10% (90% Agua). Entonces el afluente requerido será:

$$Q_a = \frac{MS}{D} = \frac{0.069 \text{ m}^3}{0.1} = 0.686 \text{ m}^3$$

Y el volumen de Agua necesario para formar la mezcla será de:

$$V_{H_2O} = Q_a - V_E = 0.686 \text{ m}^3 - 0.176 \text{ m}^3 = 0.510 \text{ m}^3$$

Con estos cálculos se pudo determinar que, el volumen útil del tanque de alimentación debe ser capaz de albergar al menos 0.686 m<sup>3</sup>. Se debe estimar un borde libre en el tanque de mínimo 0.3 m.

Bajo los mismos argumentos citados para la determinación del TRH del biodigestor de vaca, se ha seleccionado un tiempo de retención hidráulica para las excretas de conejo de 50 días.

Para calcular el volumen del digestor es necesario relacionar el TRH y el afluente requerido ( $Q_a$ ):

$$V_d = Q_a \cdot TRH = (0.686 \text{ m}^3)(50) = 34.32 \text{ m}^3$$

Una vez que se conoce la MV del estiércol y el volumen del digestor, se pudo calcular la carga orgánica volumétrica (COV):

$$COV = \frac{MV}{V_d} = \frac{39.64 \frac{kgMV}{día}}{34.32 m^3} = 1.155 \frac{kgMV}{m^3día}$$

Como en el caso anterior se tiene el volumen útil del biodigestor ( $V_d$ ), pero para determinar el Volumen total se requiere considerar el volumen de almacenamiento para el biogás y el 20 % de este volumen para las posibles variaciones en la producción de biogás. Al igual que en el biodigestor de excremento de vaca se propone poder almacenar el biogás generado por todo el TRH, es decir, 50 días.

En base a los resultados obtenidos del estudio realizado con los biodigestores de estiércol de conejo, se ha llegado a la conclusión que, en promedio, 1 kg de masa volátil (MV) de excremento de conejo produce 2.358 LBG/día (litros de biogás por día).

Por lo tanto la producción de biogás en metro cúbicos por kilogramo de MV de excremento de conejo al día será de:

$$\left(2.358 \frac{LBG}{kgMVdía}\right) \left(\frac{1 m^3}{1000 L}\right) = 2.358 \times 10^{-3} \frac{m^3BG}{kgMVdía}$$

Para la cantidad de excretas de conejo producido en la FESC se estima una producción de biogás diaria (PBD) de:

$$PBD = \left(2.358 \times 10^{-3} \frac{m^3BG}{kgMVdía}\right) (39.64 kgMV) = 0.094 \frac{m^3BG}{día}$$

Haciendo el cálculo de volumen de almacenamiento de biogás durante el tiempo de retención hidráulica:

$$0.093 \frac{m^3 BG}{dia} (50 dias) = 4.674 m^3$$

Más el 20% de volumen de seguridad:

$$3.122 m^3 (1.2) = 5.609 m^3$$

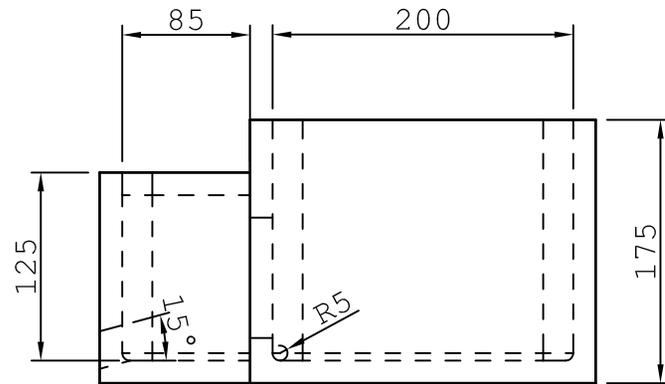
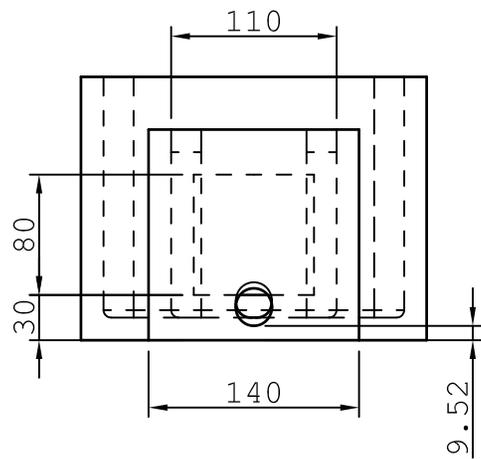
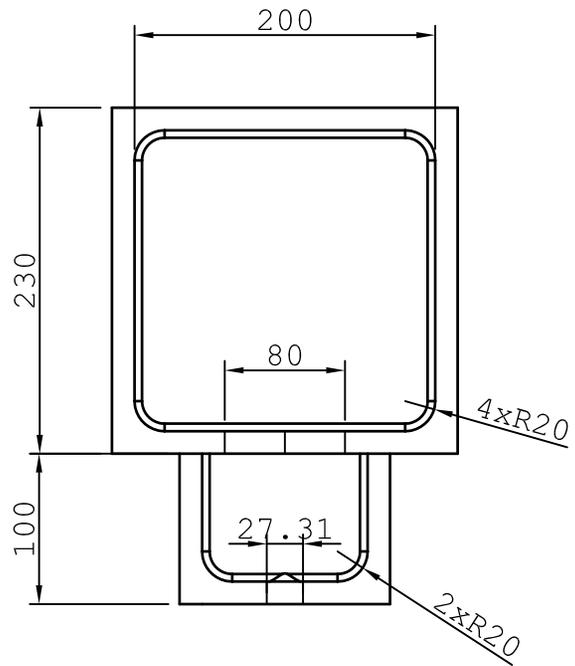
Volumen total del biodigestor:

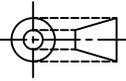
$$V_T = 34.32 m^3 + 5.609 m^3 = 39.929 m^3$$

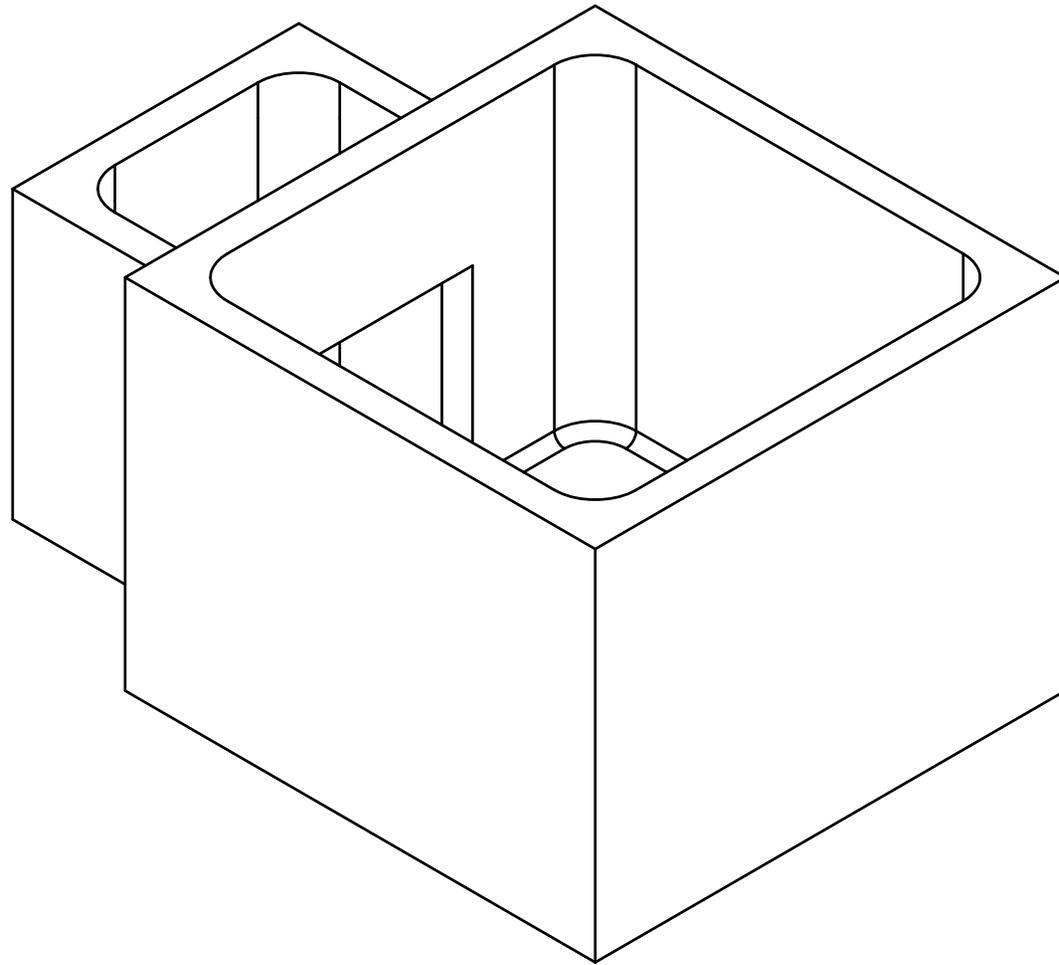
En la tabla 7.6 se resumen las dimensiones para los biodigestores propuestos para la FESC, además, en los planos 6 al 12 para el biodigestor de excremento de vaca y 13 al 19 para el de conejo, se muestran las características que se proponen para el tanque de alimentación, descarga, reactor y la vista de conjunto de los dos biodigestores.

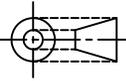
**Tabla 7.6.- Características de la propuesta para los biodigestor de excretas de vaca y conejo para la FESC.**

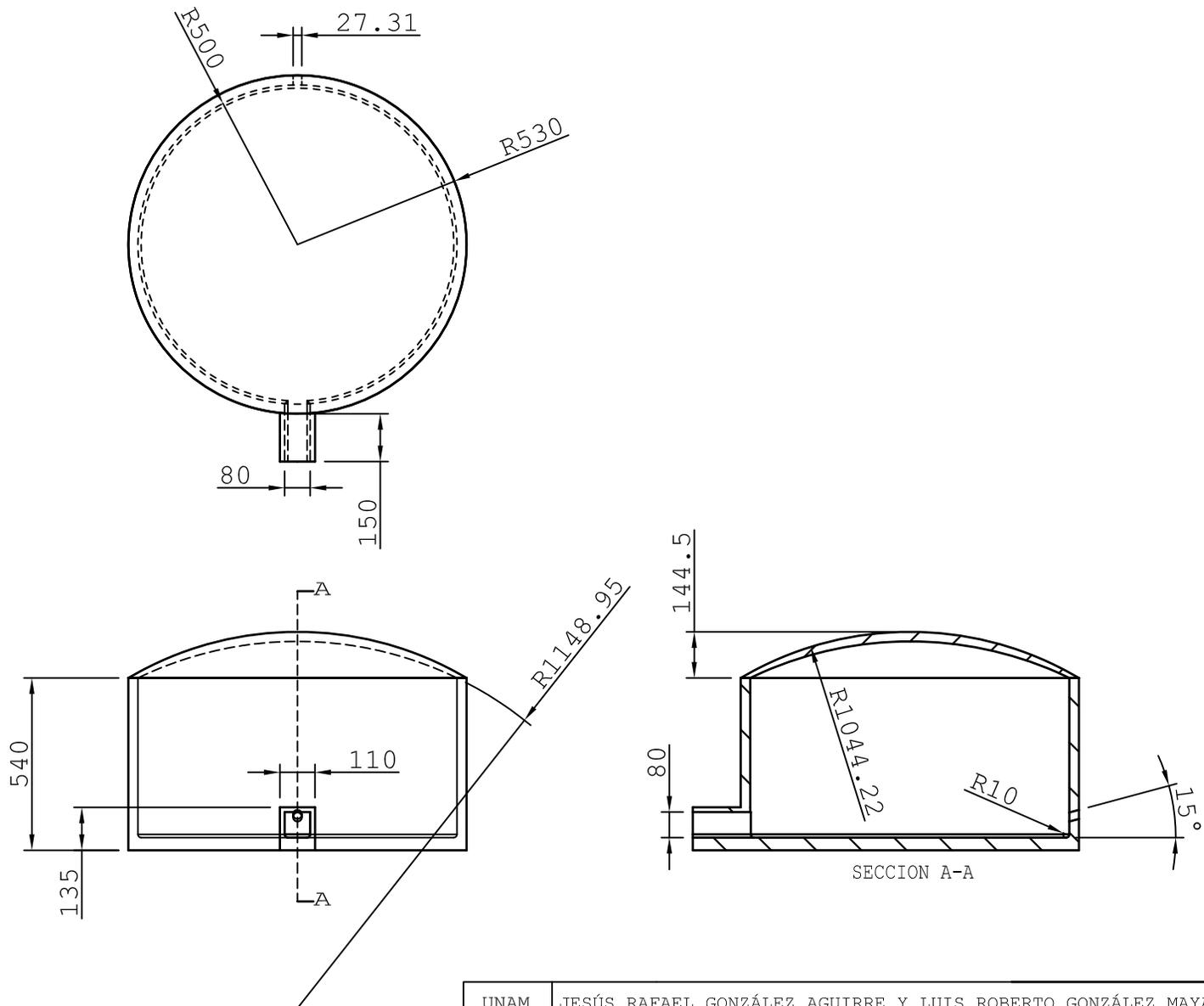
Descripción	Capacidad Biodigestor Vaca	Capacidad Biodigestor Conejo
Volumen del Tanque de alimentación	5.03 [m <sup>3</sup> ]	0.70 [m <sup>3</sup> ]
Volumen del tanque de descarga	5.03 [m <sup>3</sup> ]	0.70 [m <sup>3</sup> ]
Volumen total del biodigestor	367.20 [m <sup>3</sup> ]	39.93 [m <sup>3</sup> ]
Cantidad de estiércol diario necesario	2000.00 [kg]	132.00 [kg]
Cantidad de agua necesaria	3018.11 [Litros]	510.40 [Litros]
Producción de biogás diaria	520.58 [Litros]	93.48 [Litros]

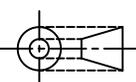


UNAM	JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA	ESCALA: 1:50
FES-C	 Tanque de alimentación (Vacas)	ACOTACIÓN: cm
I.M.E.		PLANO 6

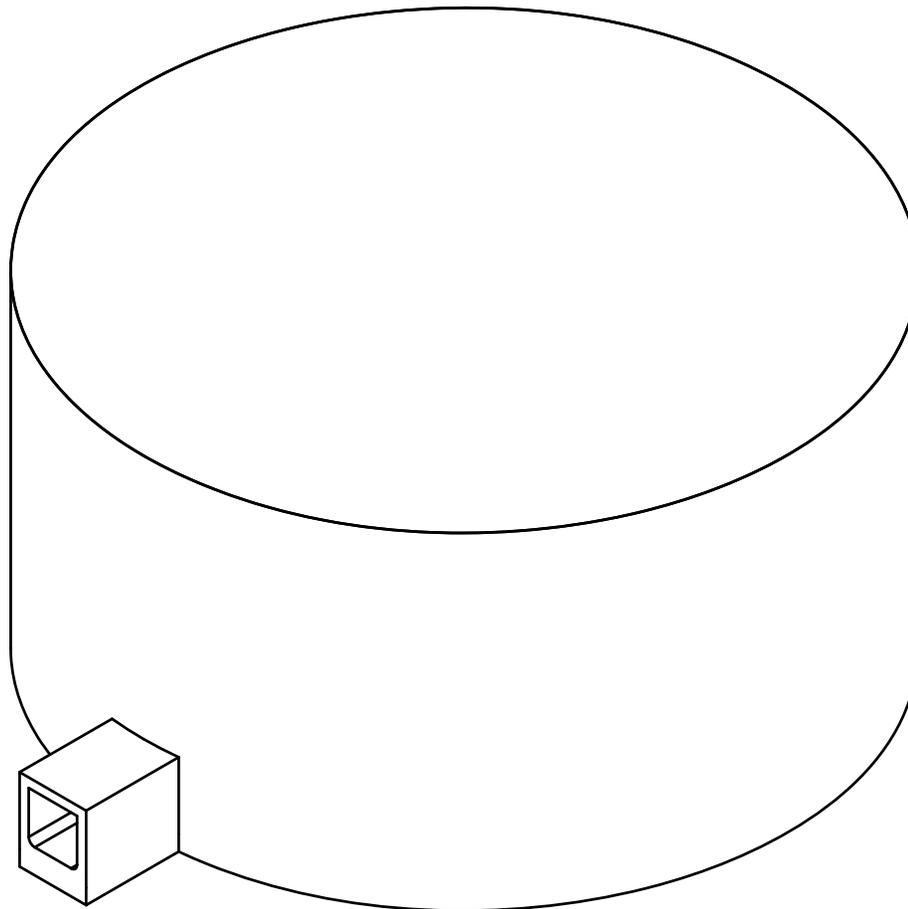


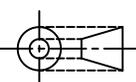
UNAM	JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA		
FES-C		Tanque de alimentación (Vacas)	Isométrico
I.M.E.			PLANO 7

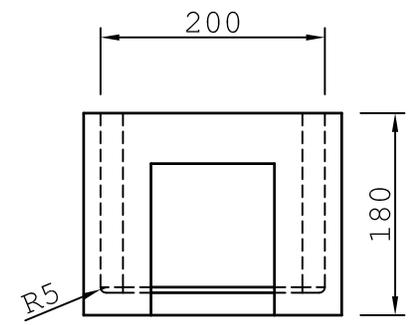
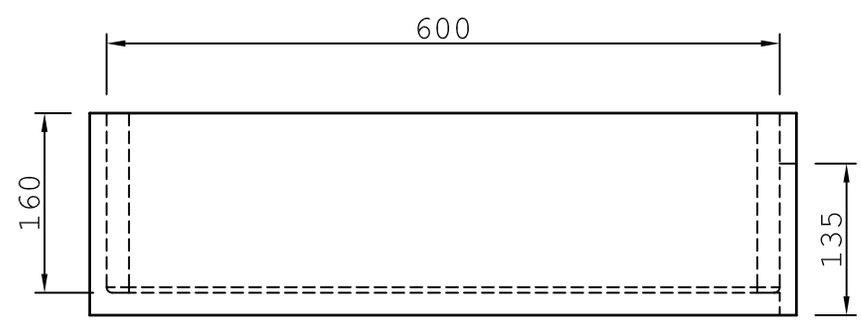
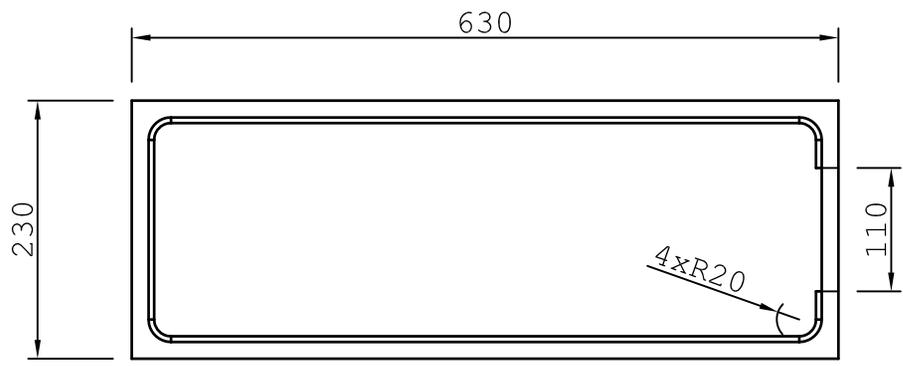


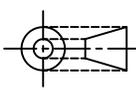
UNAM	JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA	ESCALA: 1:200
FES-C		ACOTACIÓN: cm
I.M.E.		PLANO 8

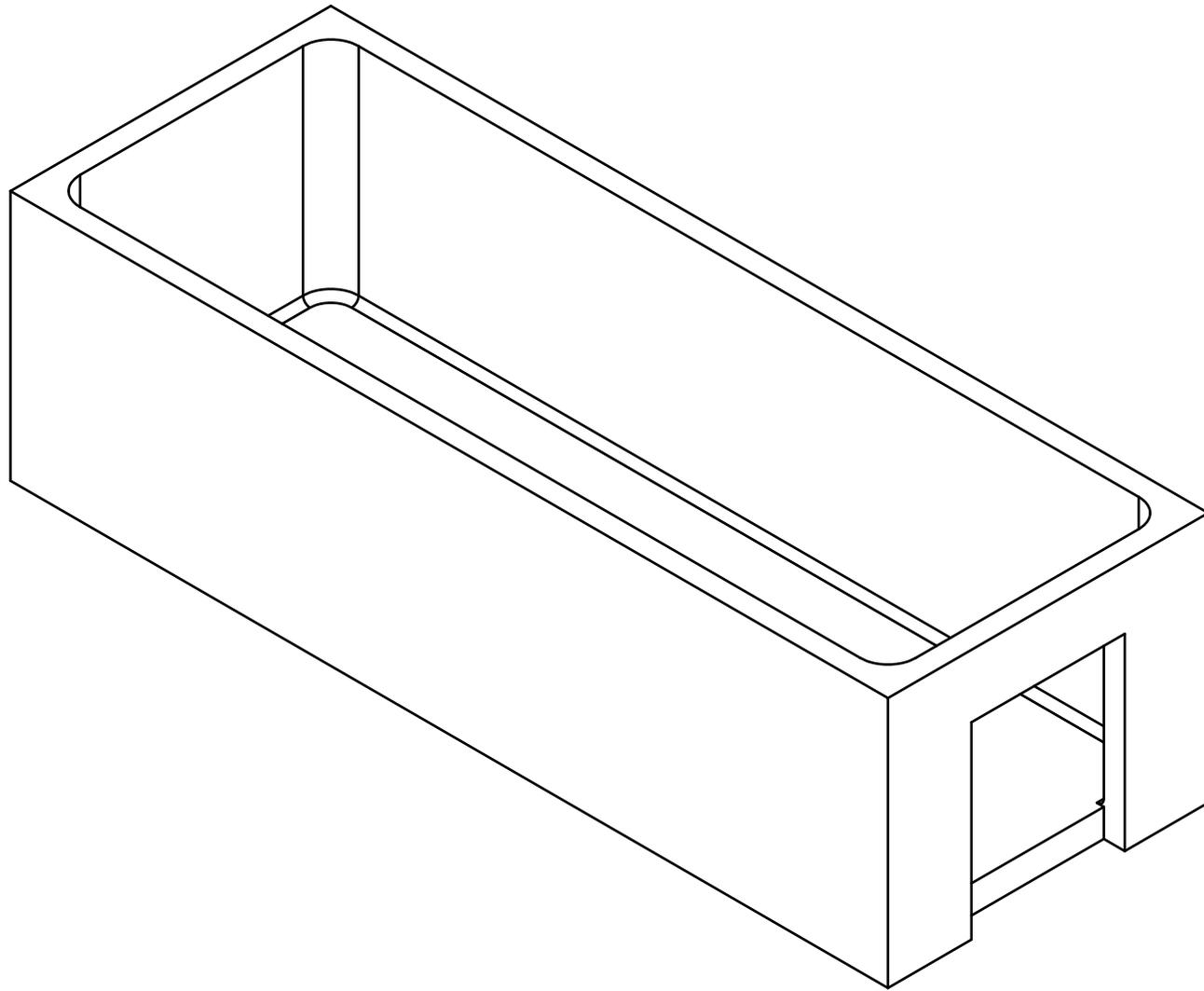
# Reactor (Vacas)

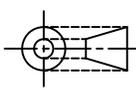


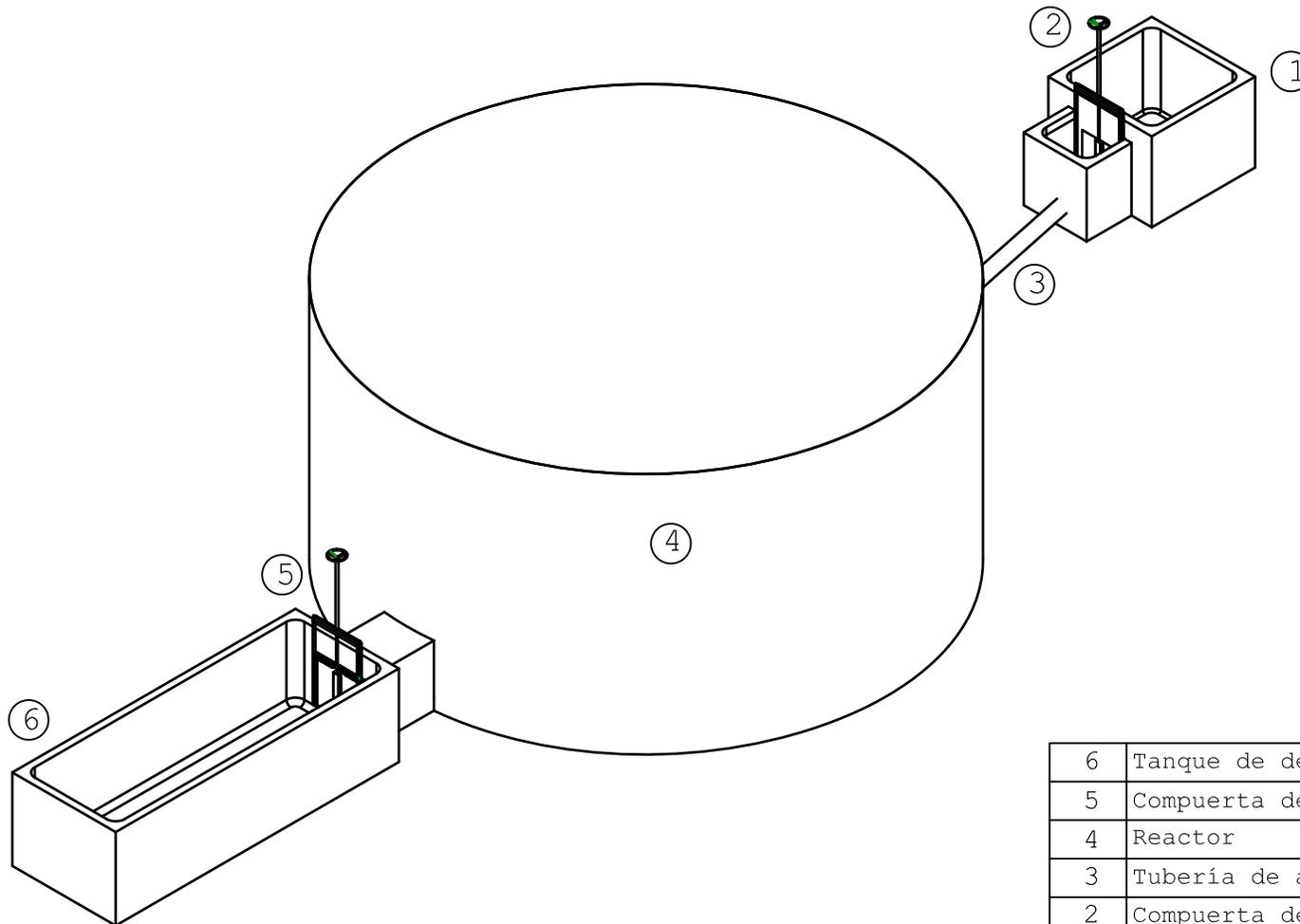
UNAM	JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA		
FES-C		Reactor (Vacas)	Isométrico
I.M.E.			PLANO 9



UNAM	JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA	ESCALA: 1:67
FES-C	 Tanque de descarga (Vacas)	ACOTACIÓN: cm
I.M.E.		PLANO 10

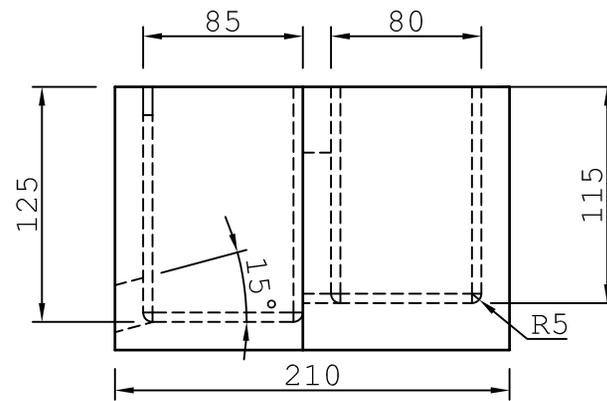
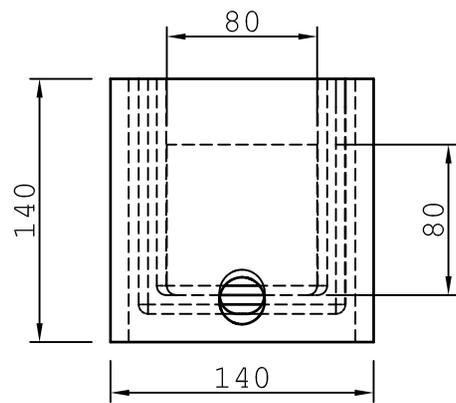
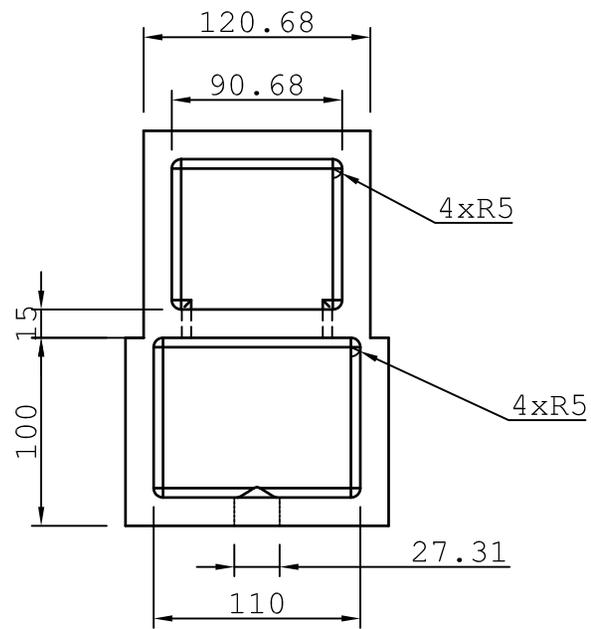


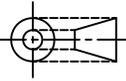
UNAM	JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA		
FES-C		Tanque de descarga (Vacas)	Isométrico
I.M.E.			PLANO 11

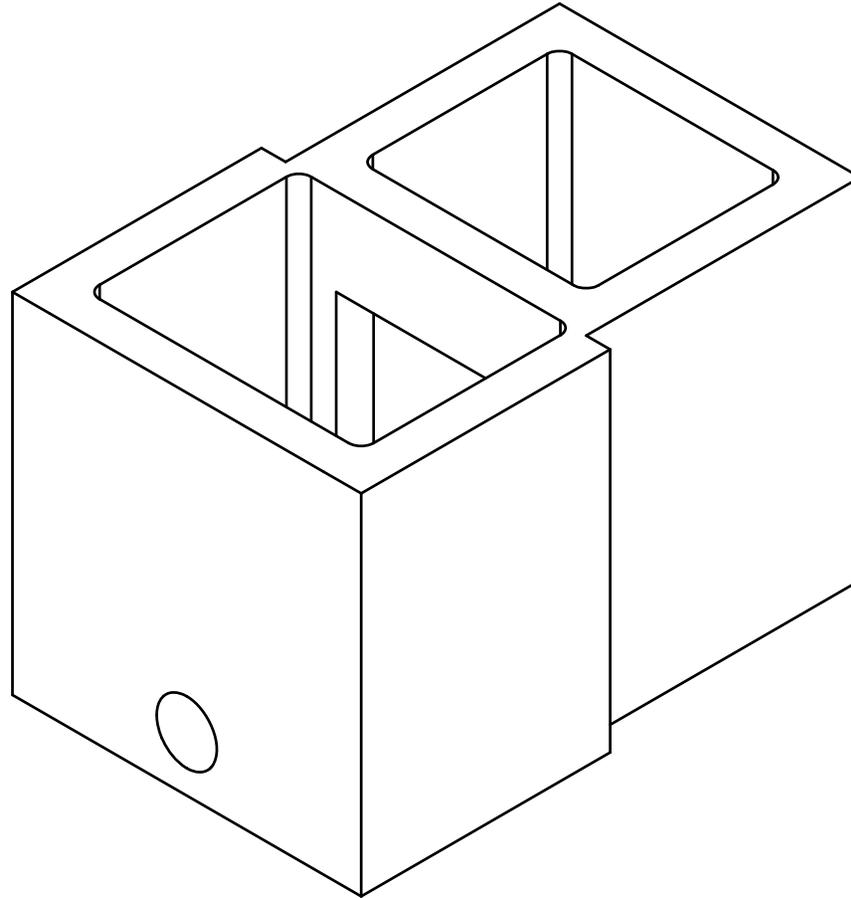


6	Tanque de descarga
5	Compuerta de descarga
4	Reactor
3	Tubería de alimentación
2	Compuerta de alimentación
1	Tanque de alimentación
#	Lista de componentes

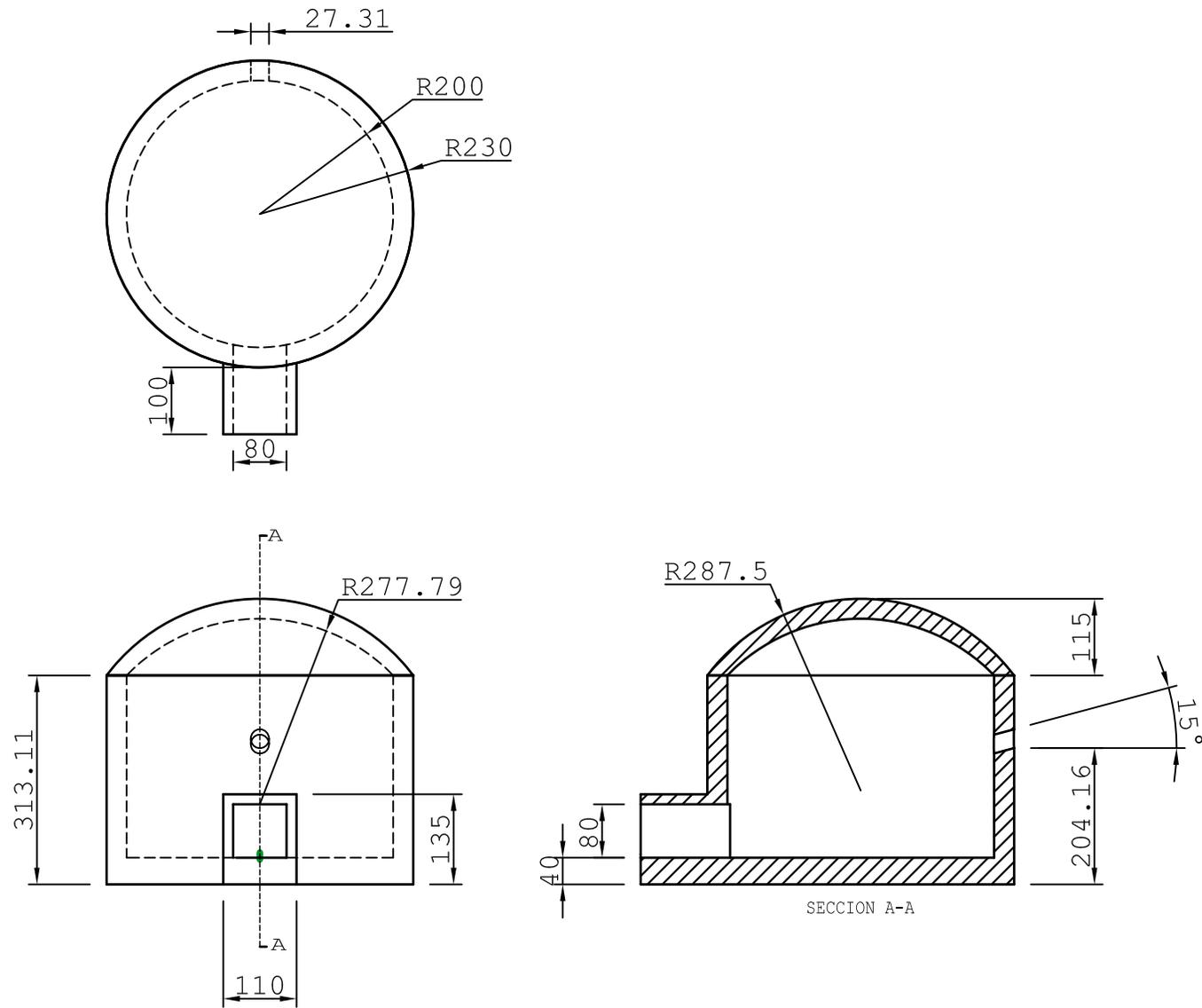
UNAM	JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA		
FES-C		Biodigestor Vacas	Isométrico
I.M.E.			PLANO 12

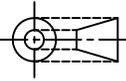


UNAM	JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA	ESCALA: 1:40
FES-C	 Tanque de alimentación (Conejos)	ACOTACIÓN: cm
I.M.E.		PLANO 13

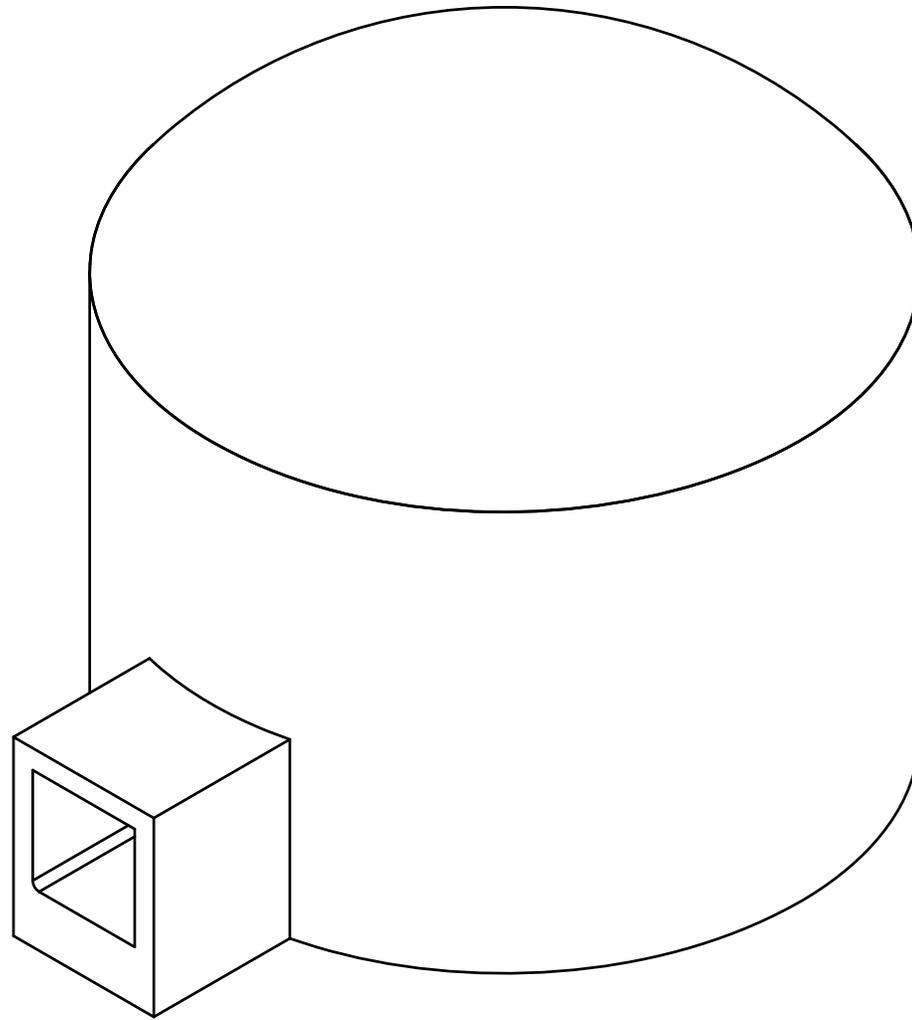


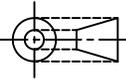
UNAM	JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA		
FES-C		Tanque de alimentación (Conejos)	Isométrico
I.M.E.			PLANO 14

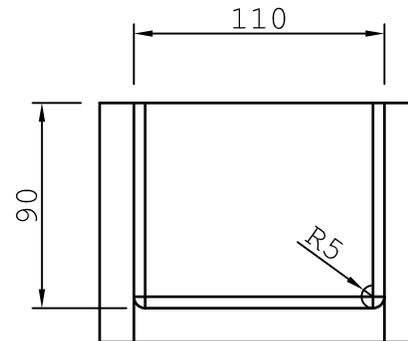
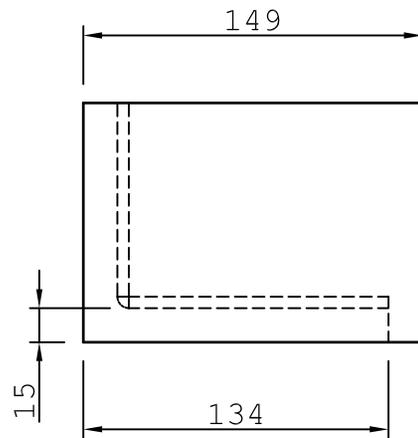
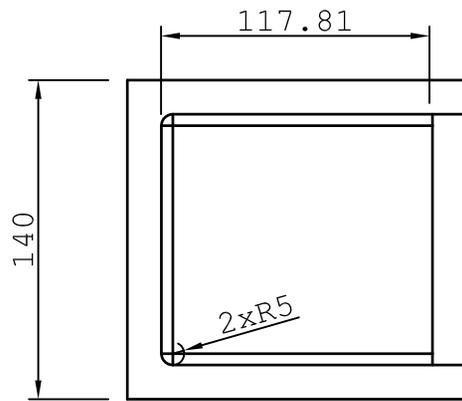


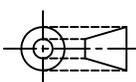
UNAM	JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA	ESCALA: 1:100
FES-C		ACOTACIÓN: cm
I.M.E.		PLANO 15

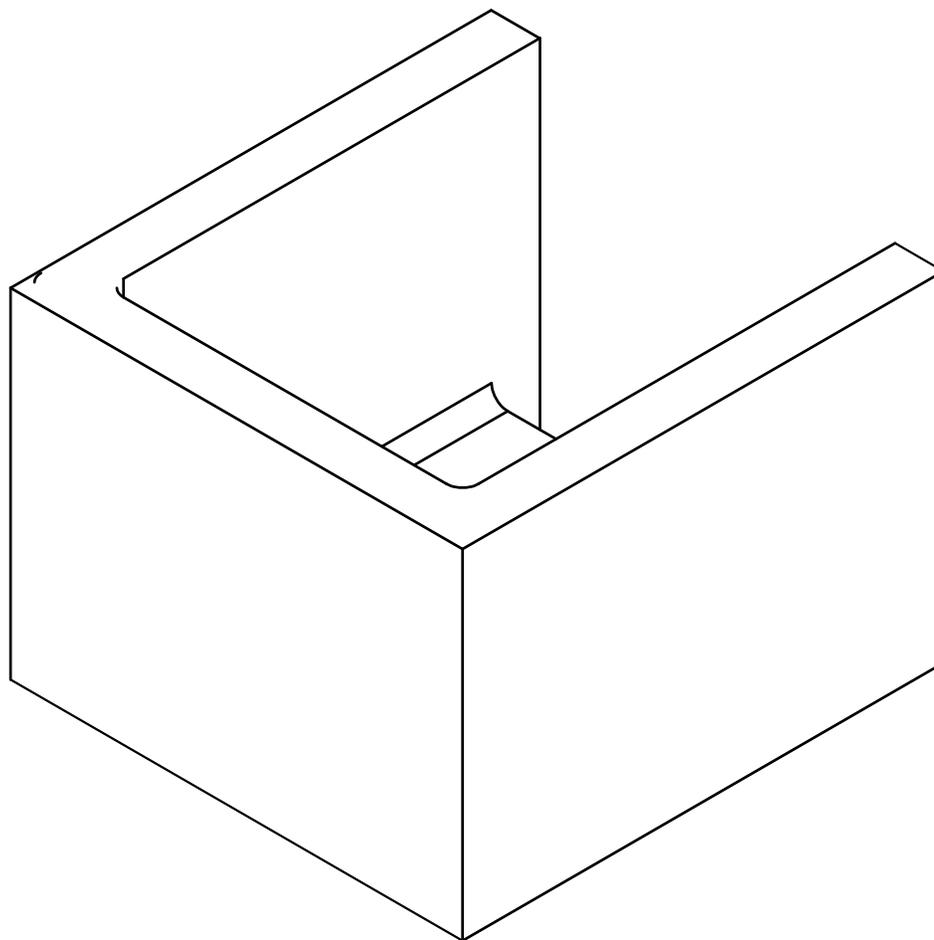
Reactor (Conejos)



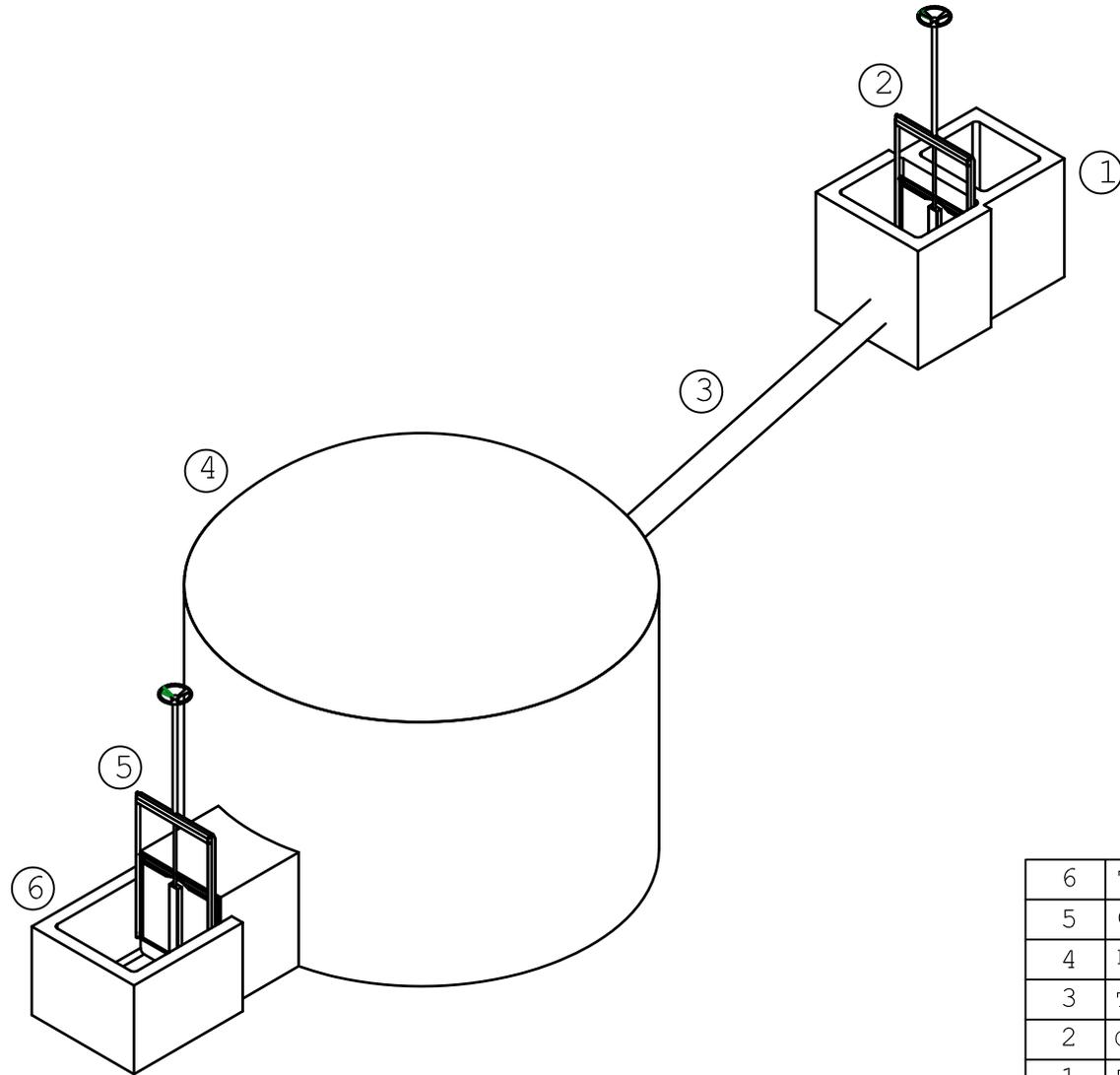
UNAM	JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA	
FES-C		Isométrico
I.M.E.		PLANO 16
Reactor (Conejos)		



UNAM	JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA	ESCALA: 1:33
FES-C	 Tanque de descarga (Conejos)	ACOTACIÓN: cm
I.M.E.		PLANO 17



UNAM	JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA		
FES-C		Tanque de descarga (Conejos)	Isométrico
I.M.E.			PLANO 18



6	Tanque de descarga
5	Compuerta de descarga
4	Reactor
3	Tubería de alimentación
2	Compuerta de alimentación
1	Tanque de alimentación
#	Lista de componentes

UNAM	JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ AGUIRRE Y LUIS ROBERTO GONZÁLEZ MAYA	
FES-C		Biodigestor conejos
I.M.E.		

# CONCLUSIONES

En base a lo realizado durante el proyecto, podemos concluir que se cumplió con los objetivos planteados al inicio del mismo, es decir, logramos diseñar, construir y poner en marcha varios biodigestores para el estudio simultáneamente de diferentes materias orgánicas así como la recopilación de datos, tales como presión, temperatura, pH y el porcentaje de metano entre otros gases que componen el biogás obtenido. También se observó mediante la experimentación que tanto la temperatura como el pH tienen una gran relevancia durante la descomposición de los residuos pudiendo incluso afectar a tal grado que detienen por completo la producción de biogás.

Además podemos agregar que antes del inicio de las pruebas esperábamos que el excremento de vaca fuera el que produjera una mayor cantidad de biogás, debido a que tiene una relación C/N cercana al valor ideal y que el excremento de ganado vacuno es rico en elementos como calcio, magnesio y fósforo, en cambio comprobamos que las excretas de conejo pese a su baja relación C/N presentan un mejor rendimiento que el excremento de vaca.

En base a la información obtenida durante este proyecto de tesis, se puede indicar que el potencial de ahorro energético es de aproximadamente 0.125 kWhr/kg de excremento de vaca y de 0.351 kWhr/kg de excremento de conejo lo que representaría que se dejan de emitir 0.084 kg de CO<sub>2</sub>/kg de excremento de vaca y 0.234 kg de CO<sub>2</sub>/kg de excremento de conejo.

Como propuesta adicional a los biodigestores para la FES Cuautitlán, se podrían realizar mezclas de excremento de conejo y vaca para observar cuál es su comportamiento y encontrar una proporción ideal de ambos componentes, empezando con buscar obtener la relación de C/N de 30, puesto que la disponibilidad de excremento de vaca es mucho mayor a la excremento de conejo dentro de la FES Cuautitlán.

Para el desarrollo del proyecto tuvimos que aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera, tales como los de Termodinámica, Química, Tecnología de Materiales, Dibujo, entre otros y aprendimos a manejar la fibra de vidrio, así como el uso de diferentes herramientas para la construcción del prototipo, tales como taladro, taladro de banco, sierra caladora, sierra circular, martillos, lijadora orbital, entre otros. Habilidades que contribuyen a nuestra formación como ingenieros.

Algunas de las mejoras que se podrían implementar a los prototipos serían: incluir un sensor interno de pH para monitorear de manera más frecuente esta importante variable, incluir un sistema de calefacción para permitir que el sustrato pueda encontrarse en el rango mesofílico o de preferencia termofílico para disminuir el TRH, diseñar un sistema de captación de biogás y así, poder acumular el biogás generado durante la prueba de cada uno de los biodigestores.

Para finalizar podemos decir que el biogás obtenido a partir de los biodigestores es una fuente viable para su aprovechamiento, ya que además de obtener biogás para usarse como combustible, se obtiene un fertilizante de excelente calidad, además de que se evita que el gas metano llegue a la atmósfera, contribuyendo con esto a disminuir las causas del calentamiento global, sin mencionar que se evita el tener un foco de infección que puede traer graves consecuencias a las personas que laboran o viven cerca de grandes cantidades de excremento o desechos orgánicos.

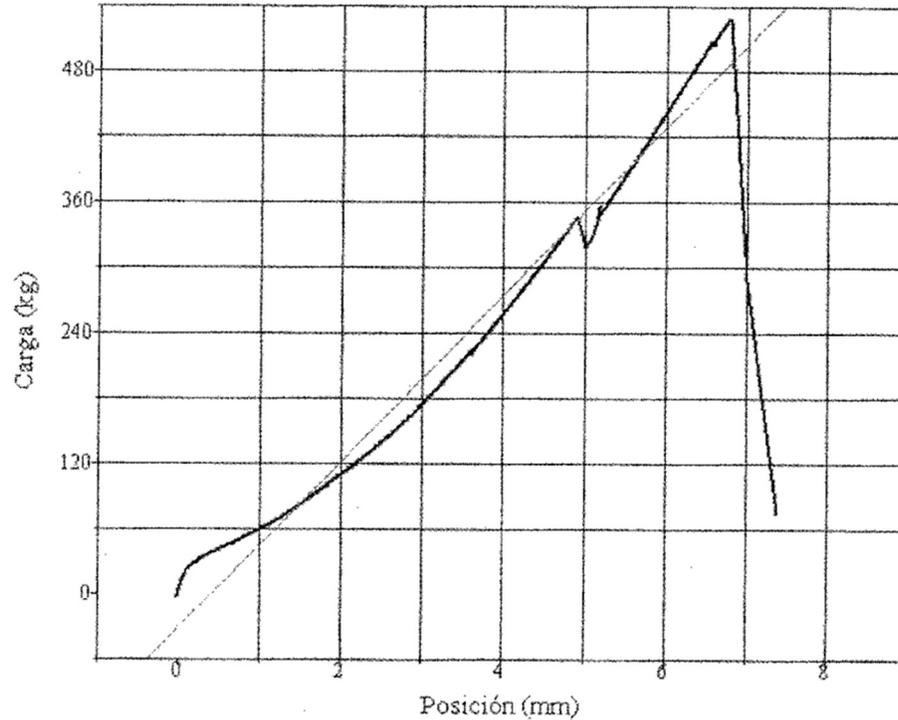
# ANEXOS

# A1. PRUEBAS DE TENSIÓN AL PRFV.

## Probeta 1.

600DXQ682309

01:59:24 p.m. 22/10/2013



### Resumen del ensayo

Contador: 309  
Tiempo transcurrido: 02:56:28  
Muestra: 1  
Operador: Noe Cortes y Juan J Garcia  
Nombre del procedimiento: Ensayo tension plano rotura  
Fecha de inicio: 22/10/2013  
Hora de inicio: 10:58:53 a.m.  
Fecha de final: 22/10/2013  
Hora de final: 01:55:21 p.m.  
Estación de trabajo: 600DXQ682  
Probado por: SATEC  
Cliente: Rafael Gonzalez  
Material: Fibra de vidrio

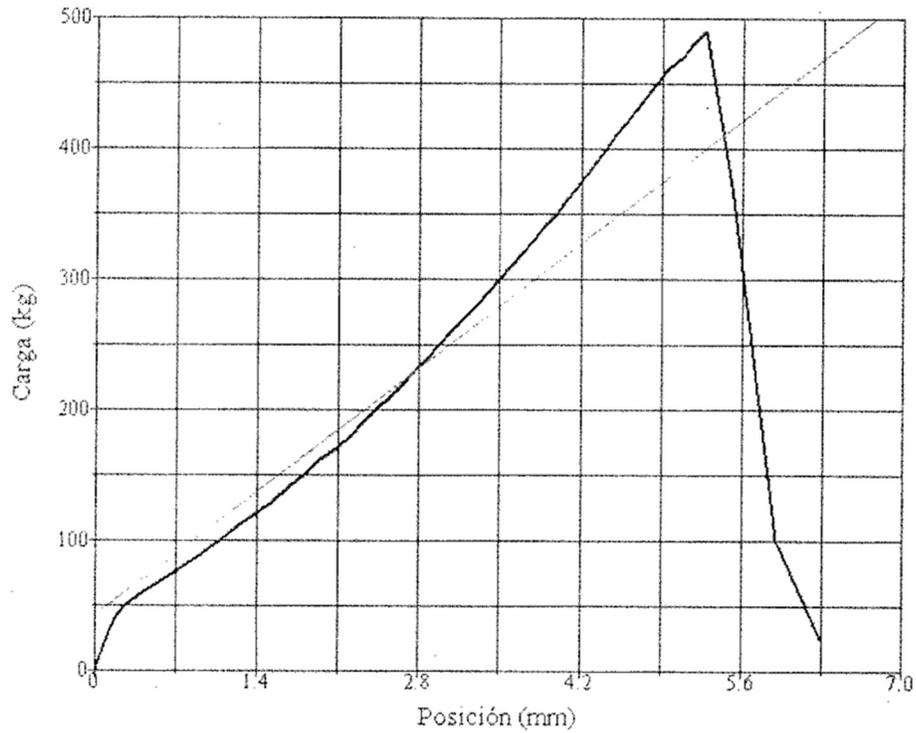
### Resultados del ensayo

Anchura: 15.6000 mm  
Área: 68.6400 mm<sup>2</sup>  
Resistencia a la tracción: 10.0000 kg/mm<sup>2</sup>  
Punto máximo Carga: 527.0000 kg  
Longitud de galga de la probeta: 50.0000 mm  
Módulo de Young: 765.9391 kg / cm  
Espesor: 4.4000 mm

## Probeta 2.

600DXQ682311

11:39:58 a.m. 24/10/2013



### Resumen del ensayo

Contador: 311  
Tiempo transcurrido: 00:24:48  
Muestra: 2  
Operador: Noe Cortes y Juan Garcia  
Nombre del procedimiento: Ensayo tension plano rotura  
Fecha de inicio: 24/10/2013  
Hora de inicio: 11:14:52 a.m.  
Fecha de final: 24/10/2013  
Hora de final: 11:39:40 a.m.  
Estación de trabajo: 600DXQ682  
Probado por: SATEC  
Cliente: Rafael Gonzalez  
Material: Fibra de vidrio

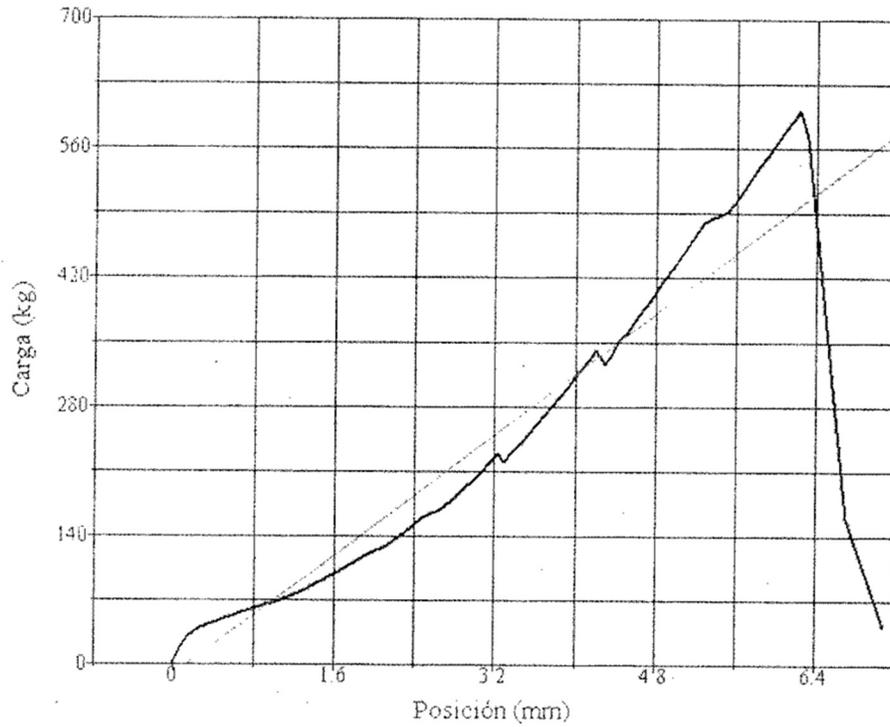
### Resultados del ensayo

Anchura: 14.2700 mm  
Área: 52.7990 mm<sup>2</sup>  
Resistencia a la tracción: 10.0000 kg/mm<sup>2</sup>  
Punto máximo Carga: 490.0000 kg  
Longitud de galga de la probeta: 50.0000 mm  
Módulo de Young: 676.8045 kg / cm  
Espesor: 3.7000 mm

### Probeta 3.

600DXQ682310

11:12:07 a.m. 24/10/2013



#### Resumen del ensayo

Contador: 310  
Tiempo transcurrido: 00:30:19  
Muestra: 3  
Operador: Noe Cortes y Juan Garcia  
Nombre del procedimiento: Ensayo tension plano rotura  
Fecha de inicio: 24/10/2013  
Hora de inicio: 10:40:01 a.m.  
Fecha de final: 24/10/2013  
Hora de final: 11:10:20 a.m.  
Estación de trabajo: 600DXQ682  
Probado por: SATEC  
Cliente: Rafael Gonzalez  
Material: Fibra de Vidrio

#### Resultados del ensayo

Anchura: 15.2000 mm  
Área: 67.9440 mm<sup>2</sup>  
Resistencia a la tracción: 10.0000 kg/mm<sup>2</sup>  
Punto máximo Carga: 601.0000 kg  
Longitud de galga de la probeta: 50.0000 mm  
Módulo de Young: 814.4428 kg/cm  
Espesor: 4.4700 mm

## A2. CONVERSIÓN DE UNIDADES.

### Longitud.

$$1 m = 100 cm$$

$$1 cm = 10 mm$$

$$1 in = 25.4 mm = 2.54 cm$$

$$1 ft = 12 in = 0.3048 m$$

### Volumen.

$$1 m^3 = 1000 Lt$$

$$1 Lt = 1000 cm^3$$

### Masa.

$$1 kg = 1000 gr$$

### Fuerza.

$$1 kg_f = 2.205 lb_f$$

### Presión.

$$1 psi = 1 \frac{lb_f}{in^2} = 0.07031 \frac{kg_f}{cm^2}$$

$$1 \frac{kg_f}{cm^2} = 98.066 \frac{kN}{m^2}$$

$$1 bar = 1.02 \frac{kg_f}{cm^2}$$

$$1 inH_2O = 0.03614 psi$$

### Tiempo.

$$1 dia = 24 hr$$

$$1 hr = 60 min = 3600 seg$$

$$1 min = 60 seg$$

# REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

## REFERENCIAS

- [1] Amarely Santana and B Pound. The production of biogas from cattle slurry, the effects of concentration of total solids and animal diet. *Trop Anim Prod* 1980: 5:2. 130 – 135.
- [2] San Thy, T R Preston and J Ly. Effect of retention time on gas production and fertilizer value of biodigester effluent. *Livestock Research for Rural Development* 15 (7) 2003.
- [3] K.J. Chae, Am Jang, S.K. Yim, In S. Kim. The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. *Bioresource Technology* 99 (2008) 1–6.
- [4] Stephanie Lansing, Raul Botero Botero, Jay F. Martin. Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters. *Bioresource Technology* 99 (2008) 5881–5890.
- [5] A.D. Atem, M.E. Indiveri, S. Llamas. Biomass storage for further energy use through biogas production. *international Journal of hydrogen energy* 35 (2010) 6048 – 6051.
- [6] Ivet Ferrer, Marianna Garfi, Enrica Uggetti, Laia Ferrer-Martí, Arcadio Calderon, Enric Velo. Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes. *Biomass and bioenergy* 35 (2011) 1668 – 1674.
- [7] Sung-Mok Lee, Geun Hyub Kim, Jae-Hwa Lee. Bio-gas production by co-fermentation from the brown algae, *Laminaria japonica*. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 18 (2012) 1512–1514
- [8] M.S. Ak, M. Muz, O.T. Komesli, C.F. Gökçay. Enhancement of bio-gas production and xenobiotics degradation during anaerobic sludge digestion by ozone treated feed sludge. *Chemical Engineering Journal* 230 (2013) 499–505.
- [9] González-González, A., et al., Energy self-sufficiency through hybridization of biogas and photovoltaic solar energy: an application for an Iberian pig slaughterhouse, *Journal of Cleaner Production* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.021>.

## BIBLIOGRAFÍA

- Askeland, Donald R. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. 3ª edición, México, International Thomson Editores, 1998.
- Beer, Ferdinand; Russell Johnston, E.; Dewolf, John T.. *Mecánica de materiales*, 3ª edición, México, McGRAW Hill, 2004.
- Buxadé, Carlos. *Zootecnia Tomo IV, Bases de producción animal*. España, Mundi – Prensa, 1995.
- Campos A.E. *Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria*. Tesis Doctoral. Laboratorio de Ingeniería Ambiental, Dpto. de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo de la Universidad de Lérida, 2001.
- Campos, Elena; Illa, Joseph; et al. *Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas*. Cataluña, Agencia de residuos de Cataluña, 2004.
- Camps Rabadá, Jaime. *Producción de estiércol cunícola y su valoración como abono*. Barcelona.
- Chang, Raymond. *Química General*. Raymond Chang. 7ª edición, McGRAW Hill, 2002.
- Deublein, Dieter; Steinhauser, Angelika. *Biogas from waste and renewable resources*. 1ª edición, Alemania, WILEY – VCH, 2008.
- García, Carlos. *Termodinámica técnica*. 4ª edición, Buenos Aires, Alsina. 1987.
- Gere, James M; Timoshenko, Stephen. *Mecánica de materiales*. 2ª edición, México, Grupo Editorial Iberoamericana, 1986.
- Guevara Vera, Antonio. *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*. 2ª edición, Perú, 1996.
- Guillen, Omar. *Energías Renovables una perspectiva ingenieril*. 1ª edición, México, Trillas, 2004.
- Hibbeler, Russel C. *Mecánica de materiales*. 6ª edición, México, Pearson Educación. 2006.

- Hill, John y Kolb, Norton. *Química para el nuevo milenio*. 8ª edición, México, Prentice Hall, 1999.
- Mataix, Claudio. *Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas*. 2ª edición, Madrid, Ediciones del Castillo, 1986.
- Megyesy, Eugene. *Manual de recipientes a presión, diseño y calculo*. 1ª edición, México, Limusa, 1992.
- Moncayo Romero, Gabriel. *Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás*. 1ª edición, España, Aqualimpia Beratende Ingenieure. 2008.
- Moncayo Romero, Gabriel. *Manual de mantenimiento de biodigestores*. 1ª edición, España, Aqualimpia Beratende Ingenieure, 2013.
- Mott, Robert L. *Mecánica de fluidos*. 6ª edición, México, Pearson Educación, 2006.
- Rolle, Kurt. *Termodinámica*. 6ª edición, México, Pearson Educación, 2006.
- Smith, William F. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. 3ª edición, Madrid, McGRAW Hill, 1998.
- Streeter, Victor; Wylie, E. Benajamin. *Mecánica de los fluidos*. 3ª edición, México, McGRAW Hill, 1988.
- Titjen, Cord. *From biodung to biogas. Historical Review of European Experience*. 1ª edición, W.J. Jewell, 1975.
- Wark, Kenneth. *Termodinámica*. 6ª edición, Madrid, McGRAW Hill. 2001.

## **CIBERGRAFÍA**

- <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/FBC1B7FFBCBAA0A1862573A70080D4BA>
- <http://hermandaddebomberos.ning.com/m/blogpost?id=3481697%3ABlogPost%3A534580>
- [http://oceanologia.ens.uabc.mx/~fisica/FISICA\\_II/APUNTES/MEDIDA\\_PRESION.htm](http://oceanologia.ens.uabc.mx/~fisica/FISICA_II/APUNTES/MEDIDA_PRESION.htm)
- <http://www.academiatesto.com.ar/cms/?q=sensores-0>
- <http://www.inpper.es/img/content/imagen3b.jpg>
- <http://www.pq.cl>