



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
(INGENIERÍA AMBIENTAL, RESIDUOS SÓLIDOS)

EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA A NIVEL DE PLANTA PILOTO DE UN  
SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA HÚMEDA PARA EL PROCESAMIENTO  
DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:  
HÉCTOR PATRICIO FABIÁN

TUTOR PRINCIPAL  
DR. ALFONSO DURÁN MORENO, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM,

COMITÉ TUTOR  
DR. JAVIER MODESTO CRUZ GÓMEZ, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM  
M. EN C. CONSTANTINO GUTIÉRREZ PALACIOS, FACULTAD DE INGENIERÍA,  
UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE, 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Javier Modesto Cruz Gómez.  
Secretario: M. en C. Constantino Gutiérrez Palacios  
1<sup>er</sup>. Vocal: Dra. Gabriela Eleonora Moeller Chávez  
2<sup>do</sup>. Vocal: Dr. Oscar González Barceló  
3<sup>er</sup>. Vocal: Dr. Alfonso Durán Moreno

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

La planta piloto de producción de biogás de la UNAM, se encuentra localizada a un costado de la Clínica Universitaria de Salud Integral Almaraz (CUSI Almaraz) ubicada en avenida Jiménez Gallardo S/N, San Sebastián Xhala km 2.5, en el municipio de Cuautitlán de Romero Rubio, Estado de México.

Laboratorio 301 del Conjunto "D" de la Facultad de Química, UNAM. CU.

**TUTOR DE TESIS:**

DR. ALFONSO DURÁN MORENO

-----  
**FIRMA**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme nuevamente la oportunidad de desarrollarme personal y profesionalmente, por siempre estaré agradecido

Al CONACYT y a la SENER por su apoyo para realizar este proyecto de tesis, que es parte del proyecto "Clúster Biocombustibles Gaseosos" (CBG).

A mi comité tutor: al Dr. Javier Modesto Cruz Gómez, al M. en C. Constantino Gutiérrez Palacios, a la Dra. Gabriela Eleonora Moeller Chávez y al Dr. Oscar González Barceló, por sus consejos y paciencia en la realización de este documento de tesis.

A mis padres Gregoria y Santiago quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades

A mis hermanos Edgar (alias "el Pato") y Rene por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias.

A toda mi familia por sus consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

A Susanita D.P.M. por apoyarme en cada decisión que tomaba, por la paciencia, los consejos, las platicas, las risas y todos esos momentos especiales que me motivaron a esforzarme un poco más cada día para lograr esta meta. TQMC

A mis amig@s. Germancito, DK, Gabriel, Dany Daniela, Frantz, Borrego, Mon bb, Karlita A., Gus, Pau, July C., Erika, Chucho, Feres, Julito "dotore", Erick, idalia, Deny, Sandra, Angelica, Manolo, que se convierten en amigos de vida y aquellos que serán mis colegas y a todos los que me faltaron, gracias por todo su apoyo y diversión

Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al Dr. Alfonso Durán Moreno, principal colaborador durante todo este proceso, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo

¡Que nadie se quede afuera, se los dedico a todos!

GRACIAS TOTALES

HPF

## Índice de contenido

TABLAS .....	5
FIGURAS .....	8
1. JUSTIFICACIÓN .....	11
2. OBJETIVOS .....	13
3. MARCO TEÓRICO.....	15
3.1 DEFINICIÓN, GENERACIÓN Y COMPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN MÉXICO .....	15
3.1.1 Residuos sólidos urbanos .....	15
3.1.2 Generación de residuos sólidos urbanos (RSU) en México .....	16
3.1.3 Composición de rsu en México .....	16
3.2 IMPACTOS GENERALES DE LOS RESIDUOS .....	17
3.3 SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL Y SU DISTRIBUCIÓN DE RSU EN MÉXICO .....	19
3.4 CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA .....	23
3.5 DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	25
3.6 ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA .....	26
3.6.1 Hidrólisis.....	28
3.6.2 Acidogénesis .....	28
3.6.3 Acetogénesis.....	29
3.6.4 Metanogénesis.....	30
3.7 VARIABLES DE ESTADO Y CONTROL DEL PROCESO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	31
3.7.1 Efecto del pH .....	31
3.7.2 Temperatura .....	32
3.7.3 Efecto de la acidez volátil y de la alcalinidad .....	33
3.8 INHIBIDORES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA .....	34
3.9 TECNOLOGÍAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	35
3.9.1 Temperatura de operación. ....	36
3.9.2 Contenido de sólidos totales .....	36
3.9.3 Frecuencia de alimentación .....	37

3.9.4 Etapas en las que se desarrolla el proceso.....	38
3.10 TECNOLOGÍA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA A NIVEL MUNDIAL .....	39
3.10.1 TECNOLOGÍAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA HÚMEDA.....	39
3.10.1.1. BTA .....	39
3.10.1.2. Strabag.....	42
3.10.1.3. Ros Roca.....	44
3.10.1.4. Weltec .....	47
3.10.2 TECNOLOGÍAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA SECA.....	49
3.10.2.1 Valorga.....	49
3.10.2.2 DRANCO.....	54
3.10.2.3 Kompogas .....	57
3.10.2.4 BEKON.....	61
3.11 DIGESTIÓN ANAEROBIA EN MÉXICO.....	65
3.11.1 Tratamiento de agua residual .....	65
3.11.2 Tratamiento de estiércol en granjas.....	65
3.11.3 Tratamiento de FORSU .....	65
4. CASO DE ESTUDIO .....	67
4.1 UBICACIÓN DE LA PLANTA PILOTO .....	69
4.2 LOCALIZACIÓN Y COLINDANCIAS.....	70
4.3 CONDICIONES METEOROLÓGICAS .....	71
4.4 CAPACIDAD Y FLEXIBILIDAD .....	72
5. METODOLOGÍA .....	73
5.1 ANÁLISIS DE LABORATORIO: .....	73
5.2 CARACTERIZACIÓN DE FORSU.....	75
5.2.1 Caracterización física .....	75
5.2.2 Caracterización química de la forsu y del digestato .....	77
5.3 OPERACIÓN DE LA PLANTA PILOTO .....	79
5.3.1. Pretratamiento .....	81
5.3.2. Área de servicios auxiliares .....	83
5.3.3. Tratamiento de agua residual .....	86
5.3.4. Biodigestión anaerobia húmeda .....	88
5.3.5. Biodigestión anaerobia seca.....	90

5.3.6. Almacenamiento, tratamiento de biogás y generación de energía eléctrica .....	92
5.3.7. Área de control .....	95
5.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA .....	96
6. RESULTADOS.....	109
6.1. CARACTERIZACIÓN DE LA FORSU.....	109
6.1.1. Caracterización física.....	109
6.1.2. Caracterización fisicoquímica de la FORSU y del digestato .....	112
6.1.2.1. DQO.....	112
6.1.2.2. Nitrógeno amoniacal y fósforo total.....	114
6.1.2.3. Alcalinidad y los AGV.....	115
6.2. PRUEBAS DE POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO .....	118
6.3. OPERACIÓN DE LA PLANTA PILOTO.....	122
6.3.1. Cantidades procesadas de FORSU.....	122
6.3.2. Valores de temperatura en el reactor anaerobio húmedo .....	125
6.3.3. Valores de pH en el reactor anaerobio húmedo.....	126
6.3.4. Valores de Agv y de alcalinidad en el reactor anaerobio húmedo .....	126
6.3.5. Cuantificación y caracterización del biogás producido.....	128
6.3.6. Generación eléctrica .....	130
6.3.7. Balance de materia para el digestor anaerobio húmedo.....	131
6.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN HÚMEDA DE LA PLANTA PILOTO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (3PBg) .....	135
7. CONCLUSIONES.....	147
8. RECOMENDACIONES .....	158
9. ANEXOS .....	164
ANEXO 9.1. MÉTODO DE CUARTEO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS.....	164

ANEXO 9.2. DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS Y HUMEDAD DEL RESIDUO ORGÁNICO. ....	166
ANEXO 9.3. DILUCIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANO (FORSU) .....	168
ANEXO 9.4. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) .....	169
ANEXO 9.5. NITRÓGENO AMONIACAL N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> .....	172
ANEXO 9.6. FÓSFORO TOTAL - .....	175
ANEXO 9.7. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE ALCALINIDAD ALFA (α) .....	177
ANEXO 9.8. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA. ....	179
10. REFERENCIAS.....	180

## Tablas

Tabla 1. Impactos generales de los tiraderos a cielo abierto (Modificado de SEDESOL, 2001).....	18
Tabla 2. Características del biogás. ....	25
Tabla 3. Características de las plantas en operación del proceso BTA (BTA International, 2010). ....	41
Tabla 4. Características de las plantas más relevantes del proceso Strabag (Strabag Umweltanlagen GmbH, 2011). ....	44
Tabla 5. Características de las plantas más relevantes del proceso Ros Roca (Ros Roca SA, 2013). ....	46
Tabla 6. Plantas de Referencia Weltec (Weltec Biopower GmbH, 2012).....	48
Tabla 7. Características de operación en promedio para las plantas de DA Weltec ((Weltec Biopower GmbH, 2012; Ramalho, 2013 ; Rapport <i>et al.</i> , 2008).. .....	49
Tabla 8. Características de las plantas más relevantes del proceso Valorga (Valorga International SAS., 2007).....	53
Tabla 9. Características de las plantas más relevantes del proceso DRANCO (Organic Waste Systems, 2013). ....	57
Tabla 10. Características de las plantas más relevantes del proceso Kompogas en Suiza (Axpo Kompogas Ltd., 2012).....	61
Tabla 11. Características de las plantas más relevantes del proceso BEKON (BEKON Energy Technologies, 2012).....	63
Tabla 12. Características de operación en promedio para las plantas de DA de BEKON (Rapport <i>et al.</i> , 2008; Spin, 2011; Schulte, 2013).....	64
Tabla 13. Plantas de DA para tratar la FORSU en México .....	66
Tabla 14. Etapas de operación de la 3PBg.....	67
Tabla 15. Datos climatológicos en Cuautitlán Izcalli (SMN,2013) .....	72
Tabla 16. Medio de cultivo basal.....	74
Tabla 17. Métodos analíticos .....	78
Tabla 18. Equipos instalados en el área de Pretratamiento. ....	83
Tabla 19. Equipos instalados en el área de servicios auxiliares. ....	85
Tabla 20. Equipos instalados en el área de tratamiento de agua residual. ....	87
Tabla 21. Equipos instalados en el área de digestión húmeda. ....	89
Tabla 22. Equipos instalados en el área de digestión húmeda. ....	91

Tabla 23.	Equipos instalados en el área de almacenamiento, tratamiento de biogás y generación de energía eléctrica.....	94
Tabla 24.	Identificación y clasificación de los costos de operación .....	97
Tabla 25.	Potencia de equipos instalados en la 3PBg. ....	98
Tabla 26.	Tiempo de operación de equipos y consumo eléctrico durante un día de operación de la 3PBg.....	100
Tabla 27.	Cantidad y costo de reactivos empleado en la operación de la 3PBg .....	102
Tabla 28.	Cantidad de energía requerida por el sistema de digestión húmeda para mantener las condiciones mesofílicas en el reactor húmedo.....	102
Tabla 29.	Tarifas de consumo de agua bimestral.....	103
Tabla 30.	Actividades realizadas por el personal de apoyo. ....	104
Tabla 31.	Conceptos considerados para el pago del personal.....	105
Tabla 32.	Información para determinar la depreciación de planta piloto. ....	108
Tabla 33.	Caracterización de la FORSU .....	110
Tabla 34.	Promedios de porcentajes de sólidos presentes en los diferentes tipos de residuos orgánicos.....	111
Tabla 35.	DQO de FORSU y digestato .....	113
Tabla 36.	Nitrógeno amoniacal y fósforo total en FORSU y digestato .....	114
Tabla 37.	Alcalinidad, AGV e índice alfa en FORSU y digestato .....	116
Tabla 38.	Cantidad de residuos orgánicos suministrada.....	124
Tabla 39.	Temperatura promedio en el digestor húmedo.....	125
Tabla 40.	Biogás generado en el reactor de digestión anaerobia húmeda, valores promedio.....	128
Tabla 41.	Parámetros estadísticos de los valores de porcentaje de metano en el biogás producido .....	129
Tabla 42.	Generación de energía eléctrica por sustrato.....	130
Tabla 43.	Costo por el consumo eléctrico en la 3PBg.....	136
Tabla 44.	Cantidad y costo de reactivos empleado en la operación de la 3PBg. ....	138
Tabla 45.	Monto por concepto de consumo de gas LP. ....	139
Tabla 46.	Costo anual por concepto de consumo de agua en la 3PBg.....	140
Tabla 47.	Costo por el concepto de pago del personal de apoyo con impuestos .....	140
Tabla 48.	Costo Total por el pago de personal de apoyo de la 3PBg. ....	141

Tabla 49.	Costo por el concepto de traslado de material orgánico a la planta piloto.	142
Tabla 50.	Costo por concepto de depreciación de la 3PBg.....	143
Tabla 51.	Monto erogado por operación del sistema de digestión húmeda.	144
Tabla 52.	Costo de operación de la 3PBg con residuo de mercados y tianguis.	146
Tabla 53.	Costo de operación de la 3PBg con residuo de tipo domiciliario..	146

## Figuras

Figura 1.	Composición de los RSU en México, (SEMARNAT,2015) .....	17
Figura 2.	Disposición final de los RSU del total generado en México, 1997-2013 (SEMARNAT, 2015).....	20
Figura 3.	Disposición final de los RSU en rellenos sanitarios, sitios controlados y sitios no controlados por tipo de localidad (SEMARNAT, 2015).....	21
Figura 4.	Rellenos sanitarios por entidad federativa, 2012 (SEMARNAT, 2015). .....	22
Figura 5.	Fuentes de energía en México (SENER, 2017). .....	23
Figura 6.	Capacidad y generación de centrales de bioenergía por región (SENER, 2017). .....	24
Figura 7.	Esquema general de la DA de la materia orgánica compleja (Schnürer & Jarvis, 2009). .....	27
Figura 8.	Diagrama del proceso BTA (BTA International, 2010).....	40
Figura 9.	Diagrama del proceso húmedo Strabag (Strabag Umwelthanlagen GmbH, 2011).....	43
Figura 10.	Esquema del proceso húmedo Ros Roca (Ros Roca SA, 2013). 45	
Figura 11.	Biodigestor Weltec (Weltec Biopower GmbH, 2012).....	47
Figura 12.	Esquema general de tratamiento de una planta con el proceso Valorga (Tomado de Valorga International SAS., 2007). .....	50
Figura 13.	Esquema del biodigestor Valorga, las flechas amarillas indican la entrada y salida de los residuos, las flechas azules la salida y recirculación de biogás (Valorga International SAS., 2007). .....	51
Figura 14.	Esquema de la Planta de DA Ecoparc en Barcelona, España (Tomado de Valorga International SAS., 2007).....	52
Figura 15.	Esquema del proceso DRANCO (Organic Waste Systems, 2013). .....	54
Figura 16.	Diagrama del proceso DRANCO de la planta en Alicante, España (Organic Waste Systems, 2013). .....	56
Figura 17.	Esquema del proceso Kompogas con biodigestor de acero (Axpó Kompogas Ltd., 2012).....	59
Figura 18.	Secciones de una planta modular Kompogas con biodigestor de concreto (Axpó Kompogas Ltd., 2012).....	60
Figura 19.	Esquema del proceso seco de fermentación BEKON (BEKON Energy Technologies, 2012). .....	63
Figura 20.	Planta de producción de biogás (3PBg) de la UNAM.....	69

Figura 21.	Vistas de ubicación de la planta piloto de producción de biogás desde la aplicación (Googlemaps, 2013).	70
Figura 22.	Equipo: Automatic Methane Potential Test System (AMPTS)	74
Figura 23.	Método de Cuarteo	76
Figura 24.	Procedimiento para la determinación de subproductos de los distintos sustratos	77
Figura 25.	Laboratorio semi fijo de la 3PBg.	79
Figura 26.	Distribución de áreas en la 3PBg	80
Figura 27.	Plano de distribución de equipos en 3PBg.	81
Figura 28.	Equipos instalados en el área de pretratamiento.	83
Figura 29.	Equipos instalados en el área de servicios auxiliares	86
Figura 30.	Equipos instalados en el área de tratamiento de agua residual.	88
Figura 31.	Equipos instalados en el área de digestión húmeda.	90
Figura 32.	Equipos instalados en el área de digestión seca.	92
Figura 33.	Equipos instalados en el área de tratamiento y almacenamiento de biogás.	95
Figura 34.	Residuos orgánicos de mercados y tianguis	112
Figura 35.	Residuos orgánicos domiciliarios	112
Figura 36.	Producción específica de biogás para muestra de tianguis y mercados	119
Figura 37.	Producción específica de biogás para muestra de residuos orgánicos domiciliarios	120
Figura 38.	Producción específica de Biogás para los diferentes tipos de muestras utilizados	121
Figura 39.	Personal Departamento de Servicios de Naucalpan	123
Figura 40.	Traslado de residuos de mercados y tianguis.	123
Figura 41.	Personal de la Dirección General de Medio Ambiente	124
Figura 42.	Traslado de residuos orgánicos domiciliarios.	124
Figura 43.	Valores de pH dentro del digestor anaerobio húmedo.	126
Figura 44.	Índice de alcalinidad alfa en el digestor anaerobio húmedo.	127
Figura 45.	Esquema simplificado y balance de la operación del biodigestor húmedo, para residuos de mercados y tianguis.	132
Figura 46.	Esquema simplificado y balance de la operación del biodigestor húmedo, para residuos orgánicos domiciliarios.	133
Figura 47.	Porcentaje de distribución de gastos en la 3PBg	145

## ABREVIATURAS

<b>AGV</b>	Ácidos Grasos Volátiles
<b>BTA</b>	BTA International GmbH. Proceso BTA® para la producción de biogás
<b>CHP</b>	Combined Heat and Power (Cogeneración de Calor y Electricidad)
<b>CO</b>	Carga Orgánica
<b>CONAPO</b>	Consejo Nacional de Población
<b>COV</b>	Carga Orgánica Volumétrica
<b>CSTR</b>	Continuous Stirred Tank Reactor (Reactor Continuo de Tanque Agitado)
<b>DA</b>	Digestión anaerobia
<b>DBO</b>	Demanda Biológica de Oxígeno
<b>DQO:</b>	Demanda Química de Oxígeno
<b>DRANCO</b>	Dry Anaerobic Composting
<b>FORSU</b>	Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos
<b>Generación per cápita</b>	Es el valor total de la generación corriente de bienes y servicios finales por habitante dentro del territorio nacional durante un cierto período de tiempo, dividido por el valor de la población total
<b>LGPGIR:</b>	Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos
<b>RSU</b>	Residuos sólidos urbanos
<b>SAGARPA</b>	Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación
<b>SEDESOL</b>	Secretaría de Desarrollo Social
<b>SEMARNAT</b>	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
<b>SF</b>	Sólidos Fijos
<b>ST</b>	Sólidos totales
<b>SV</b>	Sólidos Volátiles

# 1.JUSTIFICACIÓN

Hoy en día México enfrenta grandes retos en materia ambiental siendo sin duda uno de los más importantes lo relacionado con los residuos sólidos urbanos (RSU) y su disposición final. En México, según la cifra más reciente publicada en 2015 por la SEMARNAT, la generación de RSU alcanzó 53.1 millones de toneladas anuales., siendo la fracción orgánica la más representativa con el 52.4% (SEDESOL, 2013) . Otro reto que enfrenta México a nivel nacional es la creciente demanda de energía. La seguridad energética de México se ha visto afectada desde 2005 ya que la producción de energía en México ha ido disminuyendo a una tasa anual de 0.4%, y el consumo ha aumentado a una tasa media de crecimiento anual de 3.0% (SENER, 2015).

El desarrollo e implementación de proyectos enfocados a producir biocombustibles de segunda generación es una oportunidad para atender los dos problemas antes mencionados, esto a través de la valorización energética (digestión anaerobia) de los RSU.

La digestión anaerobia es una tecnología probada a nivel mundial para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), que además de lograr una importante reducción de la carga contaminante, transforma la materia orgánica en productos estables e inertes. Por una parte, genera biogás (principalmente metano y dióxido de carbono), que puede ser utilizado directamente, para producción de energía térmica, o bien ser transformado en energía eléctrica, contribuyendo al desarrollo sostenible de las economías, de la agricultura y de las comunidades rurales, al mismo tiempo ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y las importaciones de energía. Por otra parte, el lodo (digestato) que se obtiene como residuo de la digestión, presenta un alto contenido en nutrientes, con una presencia mínima de patógenos, por lo que puede ser utilizado como mejorador de suelos para los cultivos.

A la fecha en México existen diversas instalaciones que emplean la digestión anaerobia en su proceso operativo con el objetivo de generar biogás, tal es el caso de las plantas de tratamiento de aguas residuales, granjas de cerdos y establos lecheros. Sin embargo, en lo referente al tratamiento de la FORSU mediante procesos de digestión anaerobia, no hay instalaciones que ejecuten a nivel industrial. Por tal motivo, y a través del proyecto “BioGas-CEAR/07/2016. “CEMIE-Clúster Biocombustibles Gaseosos” en la Acción Estratégica 2 (AE2): producción de metano por digestión y co-digestión, FORSU y lodos de purga” mediante la operación de la Planta Piloto de Producción de biogás (3PBg) Facultad de Química de la UNAM se evaluará la producción de biogás a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.

## **2.OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar técnica y económicamente la producción de biogás a nivel planta piloto a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) tratados en un reactor anaerobio húmedo.

### **2.2. OBJETIVOS PARTICULARES**

- Evaluar la producción de biogás en la planta piloto de la UNAM, instalada en Cuautitlán Izcalli, Estado de México.
- Establecer las mejores condiciones de operación para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en la planta piloto de digestión anaerobia de la UNAM.
- Evaluar económicamente la producción de biogás en la planta piloto de digestión anaerobia de la UNAM.
- Determinar energéticamente el consumo- producción de la planta piloto durante su operación.
- Determinar los parámetros físicos y químicos de la fracción orgánica de los RSU que ayuden a la selección adecuada de equipos en el tratamiento previo a la alimentación de digestores anaerobio a escala real.

### 2.3. ALCANCE

- Tratar la fracción orgánica de los RSU procedentes de mercados, tianguis y residuos domiciliarios del municipio de Naucalpan de Juárez, Estado de México.
- Proponer mejoras en el diseño de la planta piloto de producción de biogás (3PBg) que favorezcan la producción de biogás.
- Determinar el costo de producción de biogás en la planta piloto.

## 3.MARCO TEÓRICO

### 3.1 DEFINICIÓN, GENERACIÓN Y COMPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN MÉXICO

#### 3.1.1 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

De acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) se definen como: Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; así como, los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos (LGPGIR,2003).

La FORSU es la fracción de residuos orgánicos húmedos y compostables de rápida degradación encontrada en los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) (Durán, 2014). La producción y composición de la FORSU depende de factores como la zona geográfica, la cantidad de habitantes y su poder adquisitivo, así como el tipo de actividad productiva, las costumbres alimenticias regionales, la temporada del muestreo y el sistema de recolección de los residuos (Palmisano y Barlaz, 1996).

### 3.1.2 GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) EN MÉXICO

En México, según la cifra más reciente publicada en 2015, la generación de RSU alcanzó 53.1 millones de toneladas al año, lo que representó un aumento del 61.2% con respecto a 2003 (10.24 millones de toneladas más generadas en ese período). Esto representa 1.2 kilogramos por persona en promedio diariamente en el mismo año. El aumento en la generación de residuos sólidos urbanos puede explicarse como resultado de múltiples factores, reconociéndose entre los más importantes el crecimiento urbano, el desarrollo industrial, las modificaciones tecnológicas y el cambio en los patrones de consumo de la población (SEMARNAT, 2015).

### 3.1.3 COMPOSICIÓN DE RSU EN MÉXICO

En cuanto a su composición, los RSU también han cambiado de manera importante en las últimas décadas en el país. En general, la composición depende, entre otros factores, de los patrones de consumo de la población: países con menores ingresos producen menos residuos, dentro de los cuales dominan los de composición orgánica, mientras que, en los países con mayores ingresos, los residuos son mayormente inorgánicos a partir de productos manufacturados y con un porcentaje mayor de productos y desechos. El caso de México ilustra la transformación entre ambos tipos de economías: en la década de los 50, el porcentaje de residuos orgánicos en la basura oscilaba entre 65 y 70% de su volumen, mientras que para 2011 esta cifra se redujo al 52.4%, En la **Figura 1** se muestra la composición de los residuos sólidos urbanos en México (SEMARNAT, 2015).

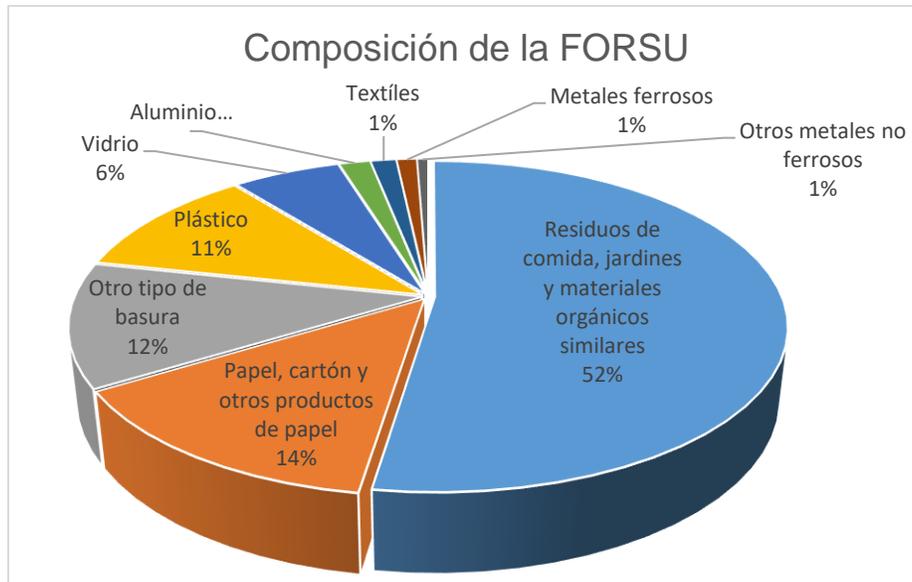


Figura 1. Composición de los RSU en México, (SEMARNAT,2015)

### 3.2 IMPACTOS GENERALES DE LOS RESIDUOS

El principal factor que influye en el problema de la generación de residuos es el crecimiento exponencial de la población y su concentración en los centros urbanos. Generalmente, la falta de cultura propicia que los residuos se depositen en lugares inadecuados, provocando la formación de tiraderos “a cielo abierto” (generalmente clandestinos), los cuales, son sitios inapropiados de disposición final, provocando impactos negativos tanto al ambiente como en la sociedad. Algunos ejemplos de estos impactos son el deterioro del paisaje, contaminación del aire, cuerpos de agua, suelo, así como impacto social y en la salud, tal como se describe en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Impactos generales de los tiraderos a cielo abierto (Modificado de SEDESOL, 2001).

<b>Impactos</b>	<b>Causas</b>
<b>Deterioro del paisaje</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acumulación de residuos sólidos, ubicados cerca de carreteras, caminos vecinales, asentamientos humanos y arroyos.</li> <li>• Incendios, dispersión de materiales ligeros y polvos.</li> </ul>
<b>Contaminación del aire</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Olores desagradables de la descomposición de los residuos orgánicos.</li> <li>• Incendios y suspensión de partículas y generación de gases de efecto invernadero.</li> </ul>
<b>Contaminación de cuerpos de agua superficial y subterránea</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ubicación en sitios de disposición final en suelos permeables.</li> <li>• Carencia de un sistema de impermeabilización y control de lixiviados.</li> <li>• Carencia de obras de desvío de aguas pluviales y falta de control de materiales ligeros.</li> </ul>
<b>Impacto en la salud humana</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proliferación de fauna nociva.</li> <li>• Contacto directo con los residuos sólidos.</li> <li>• Migración de contaminantes generados en los sitios de disposición final, a través de suelo, aire y agua.</li> </ul>
<b>Impacto social</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se acentúa la desigualdad social.</li> <li>• Abandono o falta de control de los sitios de disposición final.</li> <li>• Existencia de materiales aprovechables para reciclaje y reutilización,</li> <li>• Generación de empleos.</li> </ul>

En la **Tabla 1** se consta que los impactos de los tiraderos a cielo abierto son todos negativos. Salvo el área social, ya que se observan impactos positivos como son la existencia de materiales aprovechables para reciclaje, reutilización y generación de empleos, esto es relativo ya que la condiciones de vida de las personas que trabajan en tiraderos es deplorable.

### 3.3 SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL Y SU DISTRIBUCIÓN DE RSU EN MÉXICO

La disposición final de los residuos tiene que ver con su depósito o confinamiento permanente en sitios e instalaciones que permitan evitar su diseminación y las posibles afectaciones a los ecosistemas y a la salud de la población. La Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, define las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. En México, la mejor solución para la disposición final de los residuos sólidos urbanos son los rellenos sanitarios. De acuerdo a lo establecido en la LGPGIR, este tipo de infraestructura debe incorporar obras de ingeniería particulares y métodos que permitan el control de la fuga de lixiviados y el adecuado manejo de los biogases generados. En 2013, a nivel nacional la disposición final en rellenos sanitarios y sitios controlados alcanzó poco más del 74.5% del volumen de RSU generado, lo que representa un incremento de alrededor del 82.7% con respecto al año 1997, en el cual se disponía cerca del 40.7% de los residuos. Mientras tanto, de los residuos generados, el 21% se depositó en sitios no controlados y el 5% restante fue reciclado (SEMARNAT, 2015). En la **Figura 2** se muestra la disposición de los RSU en México.

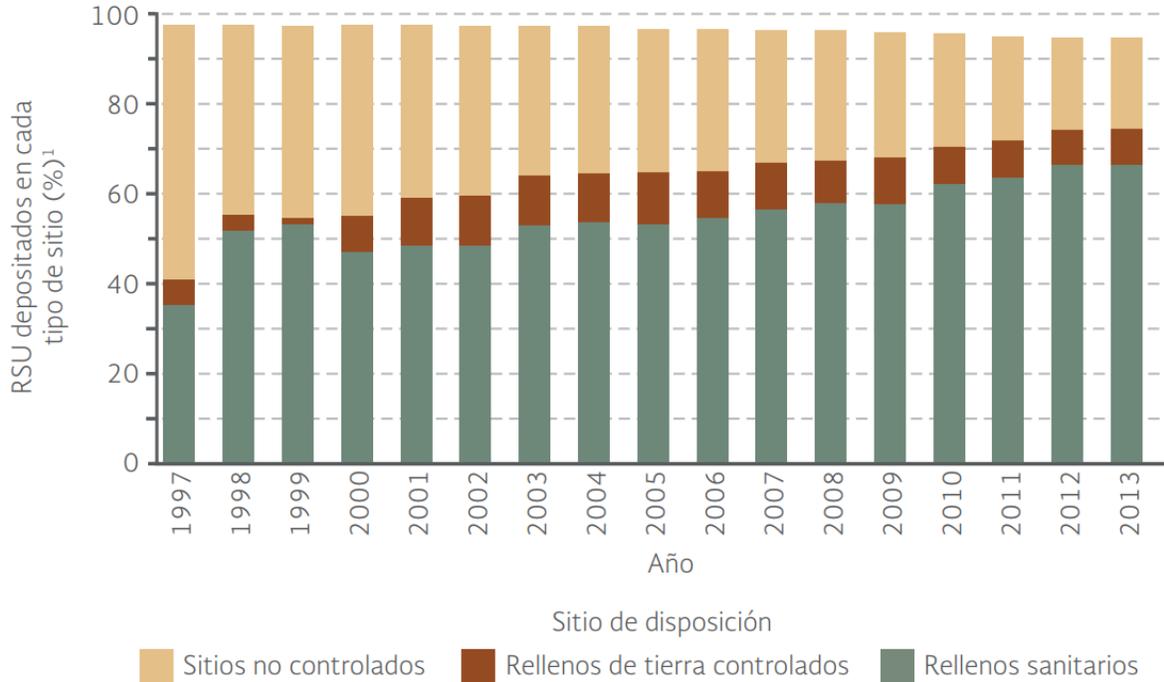


Figura 2. Disposición final de los RSU del total generado en México, 1997-2013 (SEMARNAT, 2015).

Nota: <sup>1</sup> La suma de los porcentajes no alcanza el 100% debido a que una pequeña proporción de los residuos es reciclada antes de ser dispuesta.

En general, los avances en materia de rellenos sanitarios se han dado principalmente en las grandes ciudades. Cuando se analiza la disposición adecuada de los residuos por tipo de localidad, en 2012 el 90% de las zonas metropolitanas disponían sus residuos en rellenos sanitarios y sitios controlados, mientras que tan solo el 4.5% en las localidades rurales o semiurbanas lo hacía del mismo modo. En la Figura 3 se muestra la disposición de los RSU por tipo de localidad.

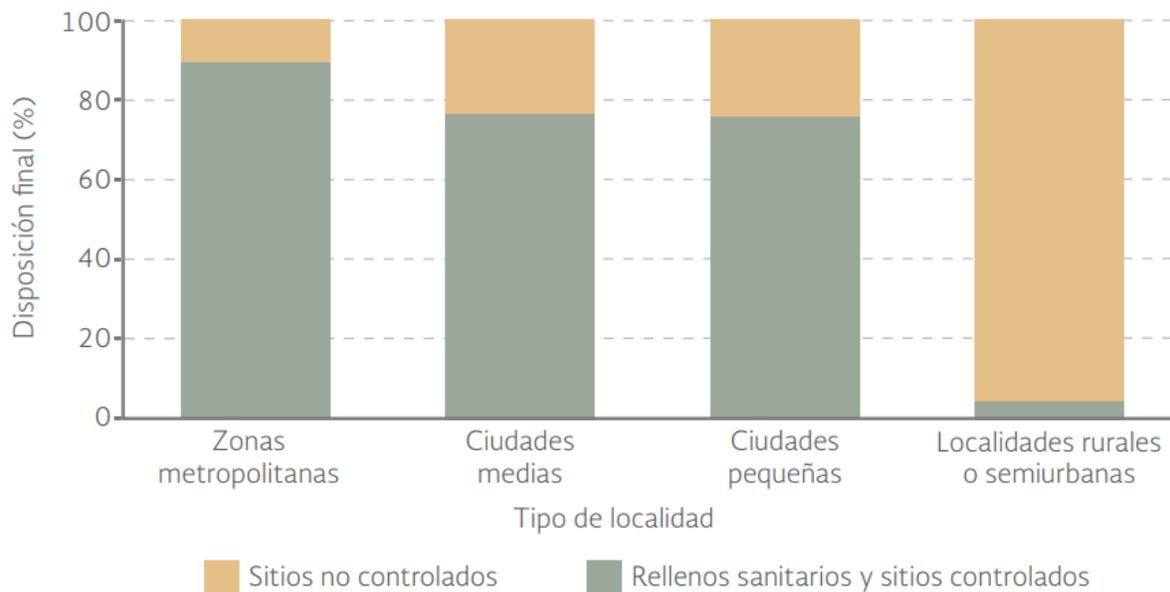


Figura 3. Disposición final de los RSU en rellenos sanitarios, sitios controlados y sitios no controlados por tipo de localidad (SEMARNAT, 2015).

Nota: <sup>1</sup> Para la Sedesol, las zonas metropolitanas son las ciudades integradas por más de un municipio con una población mayor a un millón de habitantes. Las ciudades medias son todas aquellas que forman parte del “Programa 100 ciudades” y las incluidas en los planes estratégicos de los gobiernos de los estados. Las ciudades pequeñas son aquellas mayores a 15 mil habitantes y no incluidas en las denominadas 100 ciudades y, finalmente, las localidades rurales o semiurbanas con una población menor a 15 mil habitantes.

En la actualidad, todas las entidades federativas, a excepción de la CDMX, cuentan con rellenos sanitarios para disponer sus residuos. En 2012 las entidades que tienen más rellenos sanitarios son el Estado de México (28), Jalisco (27), Veracruz y Chihuahua (18) y Guanajuato (17). En la **Figura 4** se observa la cantidad de rellenos sanitarios a nivel Nacional.

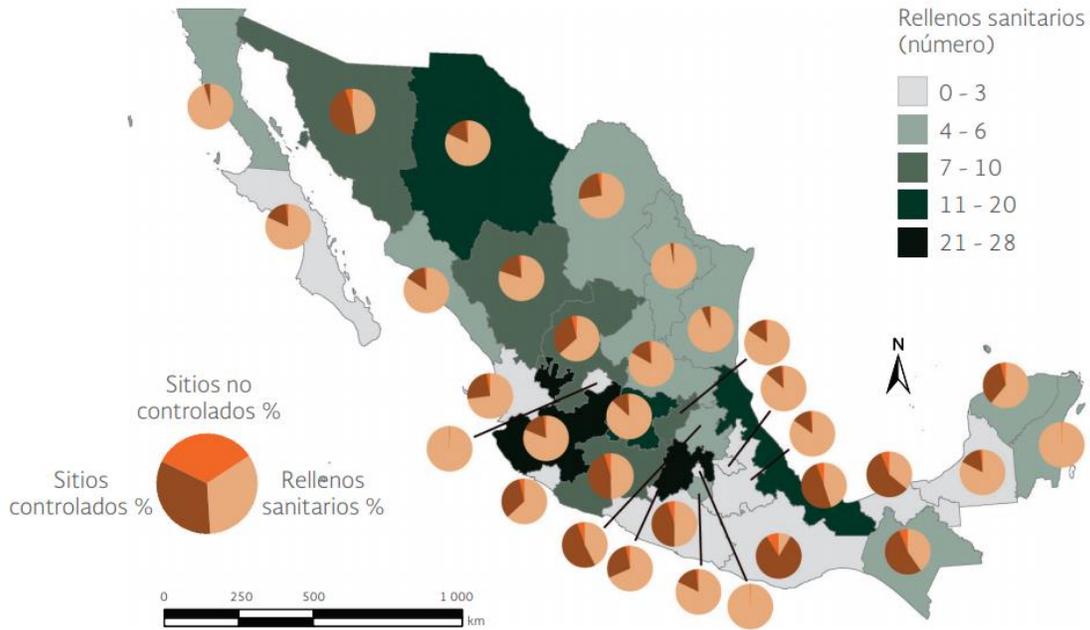


Figura 4. Rellenos sanitarios por entidad federativa, 2012 (SEMARNAT, 2015).

Nota: 1 El Distrito Federal no cuenta con ningún relleno sanitario en su territorio, y sus residuos se disponen en cuatro sitios en el estado de México: La Cañada, Cuautitlán, El Milagro y Tepoztlán; y uno más en el estado de Morelos, en Cuautla.

De lo anterior se observa que el manejo de los residuos sólidos urbanos generados a nivel nacional es a través de la disposición en rellenos sanitarios y por lo tanto, no se aprovecha el potencial energético que ofrece los residuos sólidos urbanos si estos fueran tratados a través de sistemas de digestión anaerobia para la obtención de biogás.

### 3.4 CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

A nivel mundial, el sector eléctrico tiene un compromiso claro: la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI). Ante esto, las políticas de todos los países deben impulsar una transición energética hacia un sector sustentable, eficiente y menos dependiente de los combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica.

En 2016, la producción de energía eléctrica en México fue de 319,364 GWh, de los cuales, el 79.7% provino de tecnologías convencionales y el 20.3% de tecnologías limpias. En la **Figura 5** se muestran las fuentes de generación eléctrica en México.

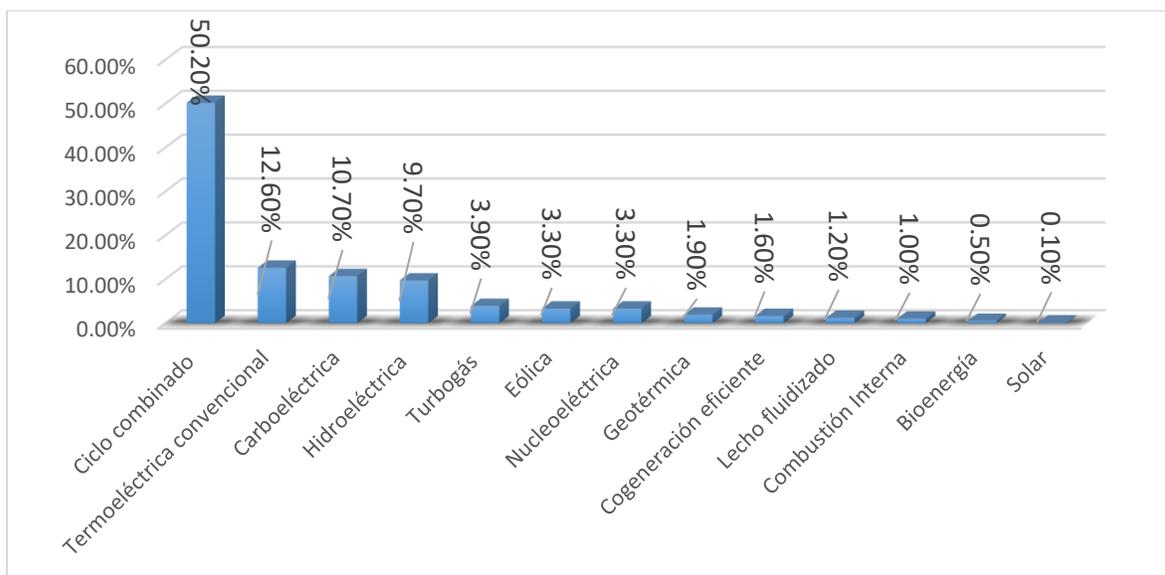


Figura 5. Fuentes de energía en México (SENER, 2017).

En lo referente a los bioenergéticos, en particular a la generación de biogás, de acuerdo con datos de la SENER, en 2016, La participación de Bioenergía en la matriz de generación eléctrica fue del 0.46% en 2016, equivalente a 1,471 GWh, de los cuales 1, 276.4 GWh corresponden a bagazo de caña y 194.8 GWh a biogás

Al cierre de 2016 se registraron 75 plantas de bioenergía dentro del SIN, siendo la región Oriental la que mayor participación tuvo tanto en capacidad instalada como generación eléctrica, con el 47.5% y 45.7% respectivamente del total nacional. En la **Figura 6** se muestra la capacidad instalada y generación de energía eléctrica, a través de biocombustibles.

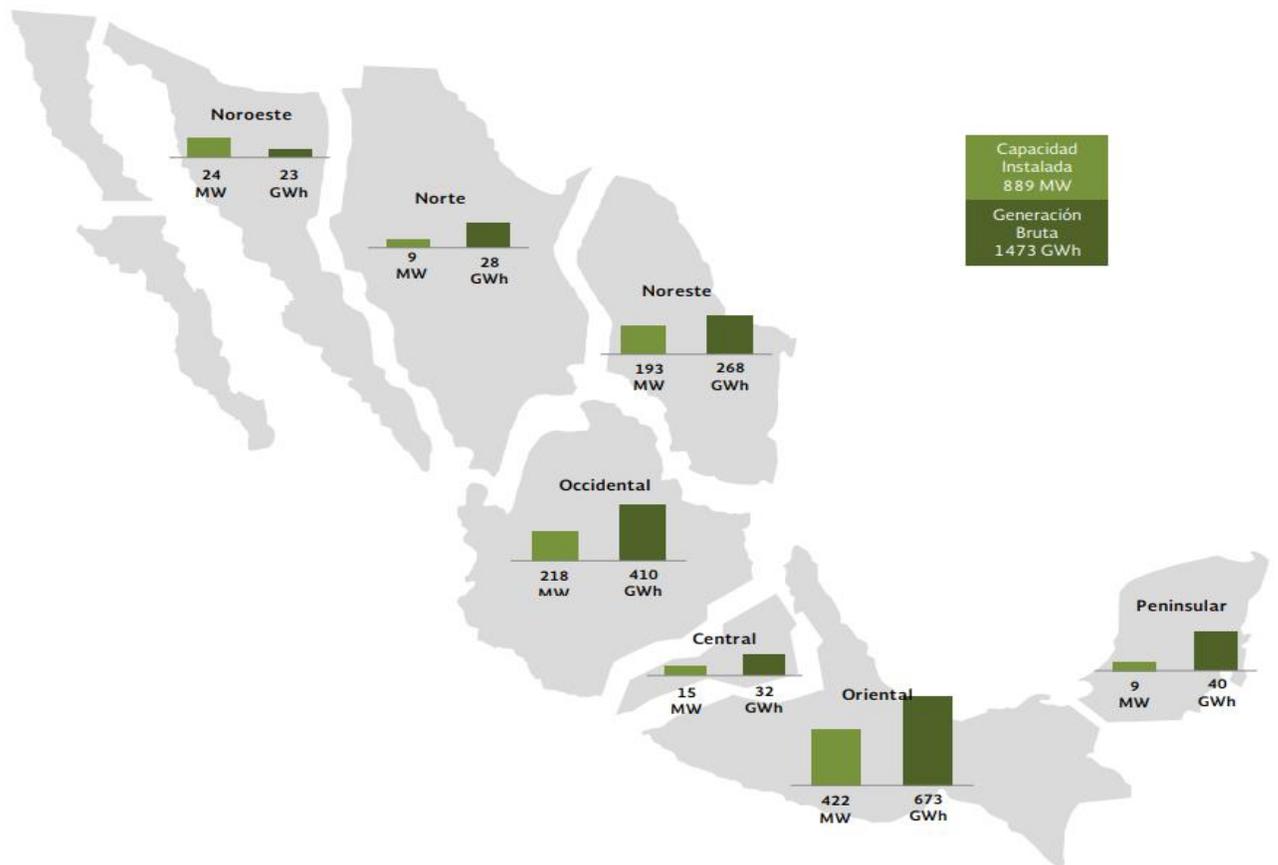


Figura 6. Capacidad y generación de centrales de bioenergía por región (SENER, 2017).

En ese contexto, se puede afirmar que existe un alto potencial de producción de biogás en el país a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), el cual aún no se aprovecha.

### 3.5 DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es un tratamiento biológico que transforma los residuos orgánicos en productos finales como el biogás (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, etc) y digestato (subproducto de la degradación), a través de las complejas reacciones bioquímicas que tienen lugar en un cultivo microbiológico realizado en las adecuadas condiciones (ausencia de oxígeno atmosférico, adecuado pH y temperatura y suficiente tiempo de retención) (Fernández, 2010).

La justificación del empleo de esta técnica es la capacidad que tiene de producir un biogás con alto poder calorífico, y por tanto, con posible aprovechamiento energético. En la **Tabla 2** se muestran las características generales del biogás.

Tabla 2. Características del biogás.

Propiedad	Composición
Composición	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 55 – 70% metano (CH<sub>4</sub>)</li> <li>• 30 – 45% dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)</li> <li>• Trazas de otros gases</li> </ul>
Contenido energético	6.0–6.5 kW h por m <sup>3</sup>
Límite de explosión	6–12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650–750°C (con el contenido de CH <sub>4</sub> mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm.
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg m <sup>-3</sup>
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kilogramos por kilomol

Fuente: Deublein y Steinhauser (2008)

El proceso de digestión anaerobia convierte la materia orgánica en una mezcla de entre un 5 y 10% de biomasa y un 90-95% de metano y dióxido de carbono, en forma de biogás susceptible de aprovechamiento y valorización económica.

### 3.6 ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Forster (2005) describe la Digestión Anaerobia (DA) como un proceso que se lleva a cabo en cuatro etapas; Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis, durante las cuales ocurre la transformación de la materia biodegradable a biogás.

La **Figura 7** muestra algunos de los productos intermedios más importantes en la formación de metano y la ruta que sigue la materia orgánica para degradarse, dentro de estos se encuentran los biopolímeros como las proteínas, carbohidratos y lípidos que son macromoléculas presentes en los seres vivos y son hidrolizados a monómeros orgánicos, los cuales pueden ser usados como sustrato para los organismos fermentativos (aminoácidos, azúcares) o para oxidantes anaerobios (ácidos grasos).

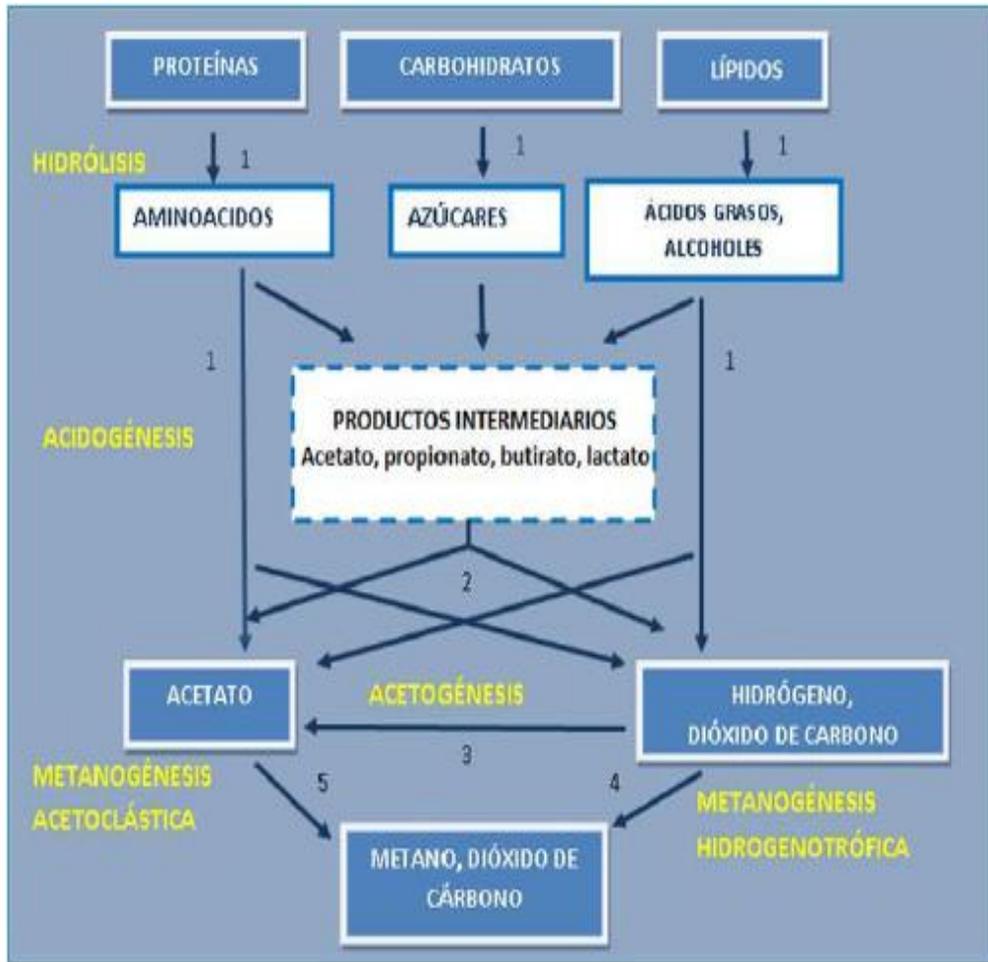


Figura 7. Esquema general de la DA de la materia orgánica compleja (Schnürer & Jarvis, 2009).

La numeración que presenta este diagrama, refiere el tipo de microorganismos que intervienen en las etapas representadas (Durán, 2014):

1. Bacterias Fermentativas
2. Bacterias Acetogénicas productoras de hidrógeno
3. Bacterias Acetogénicas consumidoras de hidrógeno
4. Bacterias Metanogénicas reductoras de dióxido de carbono
5. Bacterias Metanogénicas Acetoclásticas

### 3.6.1 Hidrólisis

Se considera a la hidrólisis como la etapa limitante para la degradación de residuos con gran cantidad de sólidos, por ello, la hidrólisis es necesaria para que los microorganismos sean capaces de metabolizar los residuos (Schnürer & Jarvis, 2009).

En esta fase las moléculas orgánicas complejas y no disueltas (carbohidratos, grasas y proteínas) se rompen en compuestos más simples (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos, alcoholes, entre otros), mediante la acción de enzimas extracelulares secretadas por algunos microorganismos acidogénicos como la celulasa, amilasa, proteasa y lipasa.

Los compuestos solubles (diferentes tipos de oligosacáridos y azúcares, alcoholes, aminoácidos y ácidos grasos) atraviesan la pared celular y constituyen las principales fuentes de carbono y energía para las células de los microorganismos (Schnürer & Jarvis, 2009).

Por otra parte, la hidrólisis está condicionada por la granulometría y grado de trituración de la FORSU, que resultan determinantes de la velocidad del proceso (Palmowski y Müller, 2000). Con el objetivo de facilitar la degradación inicial de la materia orgánica contenida en el RSU y por tanto la velocidad de hidrólisis.

### 3.6.2 Acidogénesis

En esta etapa se metabolizan los productos de la hidrólisis en el interior celular. De este modo se obtienen los ácidos orgánicos (p. je. acetato, propionato, butirato, lactato) y alcoholes, además de otros subproductos importantes para etapas posteriores (amoníaco, hidrógeno, dióxido de carbono).

A presiones de hidrógeno altas las bacterias acidogénicas producen principalmente ácidos grasos volátiles a partir de hidratos de carbono, lípidos y proteínas, y cuando

la presión de hidrógeno es baja produce  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ . Algunas vías metabólicas sólo son posibles a bajas presiones de  $\text{H}_2$  y a 5-50 ppm de  $\text{H}_2$  existe una preferencia en la formación de acetato. A altas presiones de  $\text{H}_2$  pueden dar lugar a que predomine el propionato y el butirato. Incluso, la presión excesiva de hidrógeno puede dar lugar a la inhibición del sistema (Fernández ,2010)

### 3.6.3 Acetogénesis

En esta etapa los productos finales de la etapa acidogénica se transforman en acetato, así la actividad principal de los microorganismos presentes proporciona donadores de hidrógeno, dióxido de carbono y acetato a las arqueas metanogénicas. Estos microorganismos son capaces de convertir los productos finales de la microbiota acidogénica en acetato a partir de dos rutas diferentes:

1. **Deshidrogenación acetogénica:** Se lleva a cabo como producto de la fermentación de ácidos grasos volátiles o lactato y alcoholes. Estas reacciones dependen de la concentración de hidrógeno existente, por lo tanto para que la acetogénesis tenga lugar en los digestores anaerobios, es necesario que el hidrógeno generado en el proceso sea utilizado con igual o mayor velocidad a la que se produce. Cuando la concentración de hidrógeno en el gas es muy baja (5-50 ppm), las reacciones que ocurren son termodinámicamente favorables, por lo que existirá una mayor formación de ácido acético y su energía libre será suficiente para permitir la síntesis de ATP y el crecimiento bacteriano (Fernández ,2010). El caso contrario ocurre cuando la eliminación de hidrógeno es menos eficiente, aumentando su concentración y con ello la proporción de ácidos grasos de cadena corta, tales como: ácido propiónico, butírico, valérico, isovalérico, heptanoico, entre otros, lo que puede llevar a una acidificación de reactores anaerobios.
2. **Hidrogenación acetogénica:** Algunos autores admiten la existencia de otras bacterias denominadas homoacetogénicas, que pueden crecer autotróficamente con dióxido de carbono e hidrógeno para producir acetato (reacciones de hidrogenación acetogénica) cuando las metanogénicas

consumidoras de  $H_2$  están inhibidas debido a un pH bajo. Así, se considera que el intercambio de hidrógeno es tan rápido en el digestor que originan diferentes microambientes con diferentes presiones de hidrógeno, donde ambas reacciones (acetogénicas y homoacetogénicas) ocurren de manera simultánea (Fernandez, 2010). A presión parcial de hidrógeno baja, se forman predominantemente  $H_2$ ,  $CO_2$  y acetato por las bacterias acetogénicas. Al contrario, cuando la presión parcial es alta, se forman los ácidos butírico, caprónico, propiónico y valérico, además de etanol. A partir de estos productos, las bacterias metanogénicas pueden asimilar sólo acetato,  $H_2$  y  $CO_2$ . La conversión anaerobia de ácidos grasos y alcoholes se realiza de acuerdo al gasto energético de los metanogénicos, donde ambos de forma recíproca, reciben los sustratos necesarios para el crecimiento de las bacterias acetogénicas ( $H_2$ ,  $CO_2$ , ácido acético). Alrededor del 30% de la producción total de metano, se atribuye a la reducción del  $CO_2$  a partir del  $H_2$ , y sólo 5-6% de la formación total se atribuye al hidrógeno disuelto. Esto se debe a la “transferencia de hidrógeno interespecies”, por medio de la cual el hidrógeno se traslada directamente de los microorganismos acetogénicos hacia los metanogénicos sin estar disuelto en el sustrato. La etapa de acetogénesis limita la velocidad de degradación en la etapa final. A partir de la cantidad y composición del biogás, se pueden obtener conclusiones sobre la actividad de las bacterias acetogénicas

#### 3.6.4 Metanogénesis

La metanogénesis es el último paso del proceso de degradación anaerobia de la materia orgánica. En esta etapa, la mayor parte de la energía química contenida en el sustrato es convertida en metano por la actuación de las arqueas metanogénicas. Este grupo no bacteriano requiere unas condiciones ambientales más estrictas para su desarrollo que las necesarias para los microorganismos acidogénicos. Este

grupo es el formador de metano a partir de  $H_2$  y  $CO_2$ , acetato, metanol y mono-, di- y tri-aminas fundamentalmente.

La inhibición por acidez generada en la etapa anterior se puede evitar por el consumo de los ácidos por las metanogénicas. En ausencia de la metanogénesis, el sistema podría alcanzar niveles excesivos de acidez e inhibirse completamente.

Se pueden distinguir dos grandes grupos de microorganismos metanogénicos:

- Arqueas acetoclásticas: Utilizan el acetato para generar metano
- Arqueas utilizadoras de hidrógeno (hidrógenotróficas): Utilizan el  $H_2$  y  $CO_2$  para generar metano.

El acetato participa en el 70% de las fermentaciones que producen metano mientras que la vía de  $H_2+CO_2$  representa el 30% restante (Jeris y McCarty, 1965). Las grandes producciones de  $H_2$  en la degradación anaerobia de los RSU favorece inicialmente la vía de la metanogénesis de las utilizadoras de  $H_2$ .

### 3.7 VARIABLES DE ESTADO Y CONTROL DEL PROCESO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La estabilidad y el rendimiento del proceso de degradación anaerobia de la FORSU está condicionada por determinadas variables de estado que permiten conocer y estudiar el proceso en sus diferentes fases. A continuación, se exponen: el efecto del pH, temperatura, efecto de la acidez volátil y de la alcalinidad y el efecto de la producción de biogás sobre el proceso anaerobio.

#### 3.7.1 Efecto del pH

Los procesos de biodegradación están influenciados por el pH del medio de reacción, ya que afecta a la velocidad del proceso y determina el tipo de microorganismos que se pueden desarrollar (Ratledge, 1991). Los microorganismos

anaerobios presentan dificultades de desarrollo fuera del intervalo de 5,0-8,5. La actividad coordinada del conjunto de microorganismos provoca que el pH del medio se estabilice en valores ligeramente alcalinos, en un rango 7.4-8.0. Los valores del pH de trabajo en condiciones mesofílicas se sitúan en el entorno de 7.2 a 7.5, mientras que para condiciones termofílicas el rango oscila entre 7.5 y 8.0. (Fernández ,2010)

Las arqueas metanogénicas y las bacterias acetogénicas son los microorganismos con velocidades de crecimiento más bajas de todos los implicados en el proceso y más sensibles a los cambios en las condiciones del sistema. Por el contrario, las bacterias de la fase acidogénica son menos sensibles a dichas variaciones y, por tanto, continuarán produciendo ácidos, dióxido de carbono e hidrógeno, principalmente, provocando una importante disminución del pH del medio y, como consecuencia, la inhibición de la actividad metanogénica y acetogénica. (Fernández, 2010)

### 3.7.2 Temperatura

La temperatura de operación del digestor, es considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaerobia. La velocidad de reacción en los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos, que a su vez dependen de la temperatura. En los procesos biológicos anaerobios se pueden presentar tres regímenes de temperatura los cuales se mencionan a continuación:

- Psicrófilo ( $T < 20^{\circ}\text{C}$ ) óptima  $15^{\circ}\text{C}$ .
- Mesófilo ( $20 < T < 45^{\circ}\text{C}$ ) óptima  $35^{\circ}\text{C}$ .
- Termófilo ( $T > 45^{\circ}\text{C}$ ) óptima  $55^{\circ}\text{C}$ .

La temperatura óptima indica la máxima actividad microbiana y, por tanto, las condiciones en las que se alcanza la máxima transformación de sustratos en productos.

### 3.7.3 Efecto de la acidez volátil y de la alcalinidad

La relación alfa, es una determinación empleada para indicar el grado de acidificación de un sistema biológico anaerobio por un aumento en la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV). Esta se calcula a partir del registro del volumen de titulación de la muestra proveniente del reactor con un ácido fuerte hasta dos puntos de pH: 4.3 y 5.75. Se considera que el volumen de titulación hasta pH de 4.3 corresponde a la alcalinidad por bicarbonatos y el volumen gastado entre pH de 5.75 y 4.3, corresponde a una aproximación de la alcalinidad por AGV (Ripley et al, 1986).

$$\alpha = \frac{\text{Volumen para un pH 5.75}}{\text{Volumen para un pH 4.30}}$$

De acuerdo con Jenkins et al (1983), la razón para titular hasta un pH de 5.75 se debe a que en este valor se convierte a CO<sub>2</sub> el 80% de los bicarbonatos presentes en el sistema, mientras que, según Ripley et al (1986), la titulación entre 5.75 y 4.3 representa una aproximación de la concentración de AGV.

Es recomendable que el valor del factor alfa esté por arriba de 0.5, ya que al disminuir su valor, aumentará la alcalinidad debida a AGV, y por lo tanto el sistema tenderá a la acidificación. Entre más se acerque el valor de la relación alfa a la unidad, entonces más estable será el sistema (López et al., 2000).

## 3.8 INHIBIDORES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

El proceso de digestión anaeróbica es inhibido por la presencia de sustancias tóxicas en el sistema. Estas sustancias pueden formar parte de las materias primas que entran al digestor o pueden ser subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos anaeróbicos. Sustancias tales como amoníaco, metales pesados, compuestos halogenados, cianuro, fenoles, sulfuro, amoníaco y ácidos grasos de cadena larga, forman parte del último grupo mencionado.

### 3.8.1 Nitrógeno amoniacal

El amoníaco puede estar presente en las materias primas que entran al digestor o ser producido durante la degradación anaeróbica de compuestos orgánicos nitrogenados tales como proteínas o aminoácidos. Las proteínas generalmente contienen 16% de nitrógeno. Durante el proceso anaeróbico, el nitrógeno orgánico es hidrolizado dando lugar a formas amoniacales. Aunque el nitrógeno amoniacal es un nutriente importante para el crecimiento bacteriano, una concentración excesiva puede limitar su crecimiento. El nitrógeno amoniacal es la suma del ión amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). Ambas especies se encuentran en equilibrio químico, y la concentración relativa de cada una depende del pH. De las dos especies, la que parece inhibir el proceso es el amoníaco libre ( $\text{NH}_3$ ) ya que se ha comprobado experimentalmente que el efecto inhibitorio por amonio aumenta a pH alcalino.

### 3.8.2 Sulfatos y sulfuros

La presencia de elevadas concentraciones de sulfato en el sustrato puede producir la inhibición del proceso anaeróbico, especialmente de la metanogénesis. En presencia de sulfatos, las bacterias metanogénicas compiten con las sulfato-reductoras por los mismos sustratos (acetato e hidrógeno), mostrando éstas últimas ventajas termodinámicas y cinéticas sobre las primeras. El resultado de esta

competencia determinará la proporción de ácido sulfhídrico y metano en el biogás producido.

El sulfuro es también un inhibidor para muchos grupos bacterianos. El sulfuro puede producirse durante la degradación de materia orgánica que contiene azufre (proteínas). En general, los microorganismos metanogénicos son más sensibles que los microorganismos acidogénicos y acetogénicos, comenzando a ser tóxica una concentración de 50 mg/l si los microorganismos metanogénicos no están aclimatados a los sulfuros. La forma más tóxica para los metanogénicos corresponde a la no ionizada ( $H_2S$ ), por lo que la inhibición se favorece a pH bajos y a bajas temperaturas. La forma ionizada ( $HS^-$ ) presenta menor toxicidad.

### 3.8.3 Cationes y metales pesados

Los cationes de metales alcalinos y alcalino-térreos tienen un efecto estimulador de la actividad de las bacterias a bajas concentraciones. A partir de un nivel de concentración, pueden proporcionar toxicidad provocando una disminución de la velocidad de crecimiento. La toxicidad de los cationes aumenta con el peso molecular, por lo que los metales pesados son los que provocan toxicidad a menor concentración. El orden de toxicidad de los metales pesados es  $Ni > Cu > Cr(IV) \sim Cr(III) > Pb > Zn$ .

## 3.9 TECNOLOGÍAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Generalmente los biodigestores empleados para el proceso de la DA a nivel industrial pueden ser clasificados en función de diferentes características (Fernández R.J., 2010);

- I. Temperatura de operación
- II. Contenido de sólidos totales
- III. Frecuencia de alimentación
- IV. Etapas en las que se desarrolla el proceso

### 3.9.1 Temperatura de operación.

El proceso de digestión anaerobia puede realizarse a tres rangos diferentes de temperatura:

- Psocrófilo: Palabra compuesta de griego (psyjros=en medio) y (filía=afecto) afecto al frío; Temperatura de operación menor a 20°C.
- Mesófilo: Palabra compuesta del griego (mesos=en medio) y (filía=afecto) que se desarrollan en condiciones intermedias de temperatura; Temperatura de operación en el rango de 20°C a 45°C.
- Termófilo: Palabra compuesta del griego (thermos=caliente) y (filía=afecto) que se desarrollan en condiciones altas de temperatura; Temperatura de operación mayor a 45°C

### 3.9.2 Contenido de sólidos totales

En función de la concentración de sólidos Totales (ST) en el interior del reactor, se clasifica de la siguiente manera.

- Digestión anaerobia húmeda: Con un contenido en sólidos entre el 4 y el 10%.
- Digestión anaerobia semihúmeda o semiseca: Con un contenido en sólidos de entre el 10 y el 20%.
- Digestión anaerobia seca: Con un contenido en sólidos de entre el 20 y el 35%.

### 3.9.3 Frecuencia de alimentación

Con base en la frecuencia de carga, los biodigestores se pueden clasificar en continuos, semicontinuos y discontinuos (Al Seadi et al., 2008; Deublein & Steinhauser 2008).

- **Biodigestores discontinuos:** Los biodigestores discontinuos, también llamados “por lotes” o “batch”, presentan la característica de ser alimentados una sola vez. En esta configuración se permite la degradación del sustrato hasta que las reacciones cesan o su rapidez se vuelve demasiado baja lo cual se determina cuando la producción de biogás disminuye al grado de ser casi nula; cuando esto ocurre, la operación se detiene, los lodos son removidos del biodigestor y pasan a un tratamiento posterior (Deublein & Steinhauser, 2008). Los biodigestores discontinuos pueden operar con agitación o sin ésta, así como pueden operarse en condiciones húmedas o secas, dependiendo del tipo de residuo que se maneje. Si el objetivo es tener una producción constante de biogás, deberán tenerse varios biodigestores que operen de forma paralela con distintos días de carga, para mantener fija la producción de biogás, ya que en los primeros días se obtiene la mayor producción y, posteriormente ésta decrece (Ostrem, 2004 y Varnero, 2011).
- **Biodigestores continuos:** En los biodigestores continuos la alimentación se realiza de forma continua por lo que los lodos y el biogás salen del biodigestor con un flujo continuo y constante. Dentro del biodigestor, el sustrato se mezcla mediante dispositivos mecánicos o por diferencia de presión, bombeando hacia afuera al material que ha cumplido con el tiempo de retención hidráulico (TRH) propuesto (Deublein & Steinhauser, 2008). Los biodigestores continuos presentan configuración vertical, horizontal u operar en dos etapas. Regularmente los digestores completamente mezclados son verticales, mientras que los digestores de tipo flujo pistón son horizontales (Al Seadi et al., 2008). Principalmente los biodigestores continuos pueden ser tipo Reactor Continuo Completamente Mezclado (CSTR, por sus siglas en

inglés: Continuous Stirred-Tank Reactor) o Reactor de Flujo Pistón (PFR, por sus siglas en inglés: Plug Flow Reactor), generalmente los primeros se usan para la DA húmeda, mientras que los PFR se usan en la digestión anaerobia seca (Vandevivere et. al, 2003; Al Seadi et al., 2008; Deublein & Steinhauser, 2008 y Rapport et al., 2008).

- **Biodigestores semicontinuos:** Los biodigestores semicontinuos o semibatch son comunes cuando se trabaja a pequeña escala, por lo que también son ampliamente empleados en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico. En este tipo de biodigestores el sustrato es bombeado al biodigestor entre 1 y 8 veces durante el día (Al Seadi et al., 2008; Pérez, 2010)

#### 3.9.4 Etapas en las que se desarrolla el proceso

Según las etapas en las que se desarrolla el proceso

- **Reactor monoetapa:** La mayoría de los procesos de DA se llevan a cabo en una sola etapa, lo que implica que todas las fases (Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis) se llevan a cabo en un sólo biodigestor manteniéndose todas las reacciones en equilibrio entre sí, aunque no significa que sean las condiciones óptimas para cada tipo de bacterias (Ostrem, 2004).
- **Reactores en fases separadas:** El proceso de DA se desarrolla en dos o más etapas, esto significa que las fases de la DA (Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis) se llevan a cabo en varios digestores.

## 3.10 TECNOLOGÍA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA A NIVEL MUNDIAL

Las tecnologías de Digestión Anaerobia para el tratamiento de la FORSU han tomado gran relevancia a nivel mundial ya que su desarrollo origina el uso de biogás como energía renovable, así como la minimización del impacto de la generación de residuos orgánicos. Principalmente en Europa se han desarrollado las tecnologías más relevantes, dentro de las cuales están Valorga, Kompogas, DRANCO y BTA (Braber, 1995). Otras empresas con menos experiencia, pero con un amplio desarrollo en los últimos años y con un gran prospecto a futuro por su versatilidad son Weltec y BEKON.

### 3.10.1 TECNOLOGÍAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA HÚMEDA

En este apartado se describe el proceso que utilizan algunas de las distintas tecnologías de DA húmeda, así como sus principales características. Estas tecnologías son: BTA, Ros Roca, STRABAG y Weltec. En el caso de Ros Roca y STRABAG también poseen tecnologías secas de DA pero se tomaron en cuenta solo sus procesos húmedos por tener mayor experiencia.

#### 3.10.1.1. BTA

BTA International GmbH es una compañía de origen alemán fundada en 1984 (Biotechnische Abfallverwertung GmbH & Co.). La compañía se especializa en el pretratamiento hidromecánico de diferentes tipos de residuos y la digestión de su fracción orgánica.

El proceso BTA está compuesto por dos etapas principales, el pretratamiento hidromecánico y la etapa de digestión, tal como se muestra en la **Figura 8** El proceso húmedo de pretratamiento consiste en un tratamiento físico en el cual casi todos los materiales inorgánicos que puedan tener un efecto adverso en el proceso de digestión y su producción de biogás, son removidos y llevados a un sistema de clasificación en el que puede incluir un tratamiento de Combustible Derivado de Residuos (CDR) (BTA International, 2010).

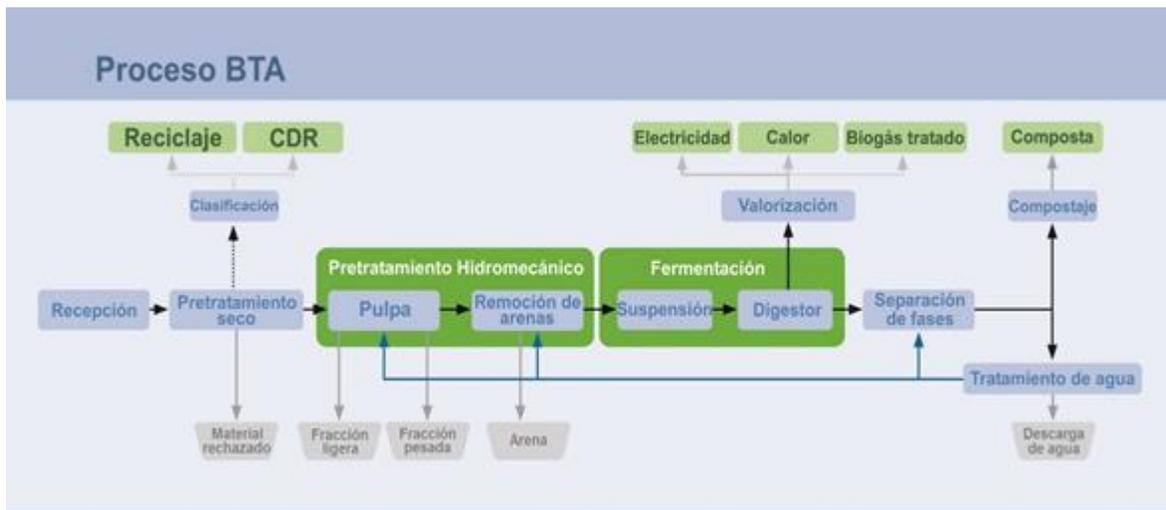


Figura 8. Diagrama del proceso BTA (BTA International, 2010).

El pretratamiento húmedo BTA se lleva a cabo en dos fases:

- I. En la primera se forma una suspensión de toda la materia orgánica fermentable contenida en los residuos. Este proceso se realiza mediante el equipo "*BTA Waste Pulper*" (Bozano, 2009).
- II. En la segunda fase, la fracción fermentable es separada de la no fermentable, es decir, se separan los inorgánicos restantes y la arena que contengan los residuos orgánicos. Este procedimiento se realiza mediante otro equipo, el "*BTA Grit Removal System*" (Biotec, 2011).

Después de esta fase, la suspensión pasteurizada se bombea hacia los biodigestores, antes de llegar a éstos se encuentra un tanque donde se mezcla la corriente pasteurizada con una corriente que recircula digestato, para formar una suspensión “amortiguadora” de nutrientes para el proceso. La temperatura del proceso de digestión se mantiene a 35 °C. El digestato remanente en los biodigestores se lleva a un filtro prensa para separar la fase líquida de la fase sólida. La fase sólida es sometida a un tratamiento aerobio, el cual permite la generación de composta de alta calidad (Bozano, 2009).

Los biodigestores generalmente se construyen de concreto y están térmicamente aislados; en promedio, cada biodigestor tiene una capacidad de 1800 m<sup>3</sup> y están equipados con sistemas mecánicos de agitación (BTA International, 2010). En la **Tabla 3** se muestran algunas plantas relevantes que utilizan la tecnología de BTA en su proceso.

Tabla 3. Características de las plantas en operación del proceso BTA (BTA International, 2010).

<b>Característica de operación</b>	<b>Ontario, Canadá</b>	<b>Barcelona, España</b>	<b>Castelleone,It alia</b>
<b>Arranque</b>	2000	2001	2010
<b>Capacidad de la planta (t/año)</b>	150,000	250,000	100,000
<b>Producción de biogás (Nm<sup>3</sup>/t)</b>	105	80	85
<b>Producción de metano (Nm<sup>3</sup>/t)</b>	71	44	56
<b>Producción de energía eléctrica (kWh/t)</b>	220	175	215
<b>Consumo de energía eléctrica (kWh/t)</b>	33	25	31
<b>Tiempo de retención (d)</b>	15	14	15
<b>Sólidos Totales (%)</b>	12	10	10
<b>Temperatura de operación (° C)</b>	37	37	38
<b>Costo de inversión (\$USD año/t)</b>		512	550

<b>Referencias</b>	(Arsova, 2010)	(Arsova, 2010)	(Biotec, 2011)
--------------------	-------------------	-------------------	----------------

### 3.10.1.2. Strabag

Strabag Umweltanlagen GmbH es una empresa alemana especializada en el tratamiento mecánico-biológico de residuos sólidos. Strabag ofrece (al igual que Ros Roca) dos tipos de procesos para la generación de biogás a partir de diferentes tipos de residuos, el proceso húmedo es recomendado para la co-digestión con estiércol o la digestión de restos de comida y lodos residuales; y el proceso seco de flujo pistón, utilizado para sustratos con un elevado contenido de sólidos totales (Strabag Umweltanlagen GmbH, 2011).

El proceso húmedo puede ser de una o de dos etapas, dependiendo de los residuos a tratar y de las condiciones de operación de la planta. El proceso húmedo de dos etapas (**Figura 9**) consiste en una operación en línea de un tanque donde se lleva a cabo la hidrólisis de los residuos, seguido por el tanque principal donde se lleva a cabo la metanogénesis. Esta tecnología, patentada por Linde-KCA, proporciona una estabilidad del proceso e incrementa la cantidad de materia orgánica fermentada (Strabag Umweltanlagen GmbH, 2011).

Después del pretratamiento, los residuos se transportan al tanque de hidrólisis. Este tanque está diseñado para funcionar como amortiguador entre la cantidad de residuos cargados y la cantidad de residuos que se envían al biodigestor principal. Inmediatamente después, los residuos pasan al biodigestor donde se lleva a cabo la metanogénesis. El biodigestor está diseñado para tener un sistema de agitación por medio de un tubo de aspiración en el centro para la recirculación de biogás, que también puede ser utilizado para la transferencia de calor, además incluye un sistema de supresión bioquímica de H<sub>2</sub>S al alimentar pequeñas cantidades de aire y sin la ayuda de sustancias químicas (Strabag Umweltanlagen GmbH, 2011).

La suspensión de residuos fermentados se deshidrata a través de un decantador, donde la fase sólida puede utilizarse directamente como composta o recibir un tratamiento para mejorar su calidad; mientras que la fase líquida se recircula al tanque del pretratamiento para disolver los residuos (Strabag Umweltanlagen GmbH, 2011).

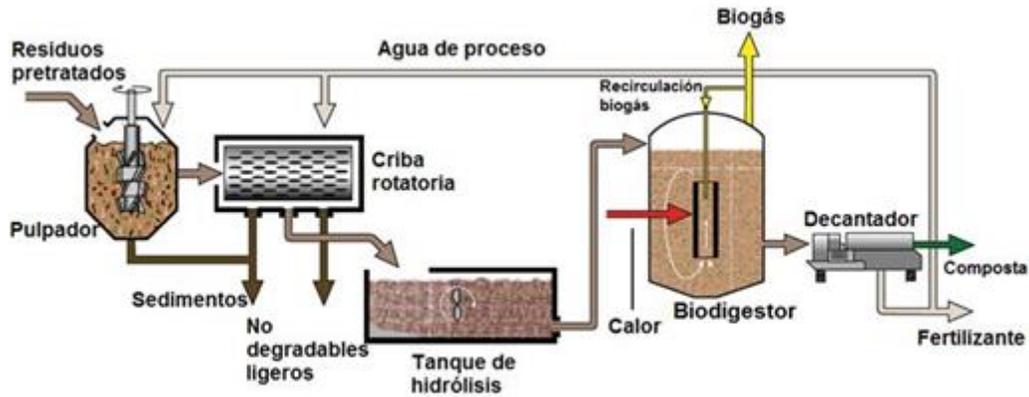


Figura 9. Diagrama del proceso húmedo Strabag (Strabag Umweltanlagen GmbH, 2011).

En la **Tabla 4** se indican las plantas más relevantes que utilizan la tecnología de Strabag en su proceso.

Tabla 4. Características de las plantas más relevantes del proceso Strabag (Strabag Umweltsanierungs GmbH, 2011).

Característica de operación	Lille, Francia	Brest, Bielorrusia	Midenmeer , Holanda
Arranque	2006	2011	2011
Capacidad de la planta (t/año)	108,600	100,000	80,000
Producción de biogás (Nm <sup>3</sup> /t)	92	105	103
Producción de metano (Nm <sup>3</sup> /t)	58.5	63	66
Producción de energía eléctrica(kWh/t)	220	255	245
Consumo de energía eléctrica (kWh/t)	17	24	24
Tiempo de retención (d)	20	21	21
Sólidos Totales (%)	9.5	10	12
Temperatura de operación (° C)	37	37	36
Costo de inversión (\$USD año/t)	455	451	431
Referencias	(Strabag Umweltsanierungs GmbH, 2011); (Tsilemou & Panagiotakopoulos, 2006)		

### 3.10.1.3. Ros Roca

La compañía Ros Roca se especializa en el diseño, fabricación y desarrollo de procesos de ingeniería ambiental (Ros Roca SA, 2013).

Para este proceso (**Figura 10**) se aplica un pretratamiento que depende del tipo de residuo a tratar. Si se trata de FORSU, se implementa un sistema de separación manual o automática de los materiales no biodegradables más grandes que aún contengan los residuos (Korz, 2010).

Los residuos se colocan en un búnker para ser llevados a una trituradora y de esta forma reducir su tamaño de partícula. Después pasan a un tanque de mezclado donde se añade agua de proceso para mantener un porcentaje de ST menor al 20% formando una pulpa. En este tanque se separan algunos materiales pesados como piedras, arena y fragmentos de vidrio. Inmediatamente después, los residuos pasan por un tromel o tamiz que se encarga de remover la fracción ligera para continuar el proceso con la fracción restante. Esta fracción se lleva a un tanque para formar una suspensión homogénea y precalentarse a 37 °C antes de entrar al biodigestor (Korz, 2010).

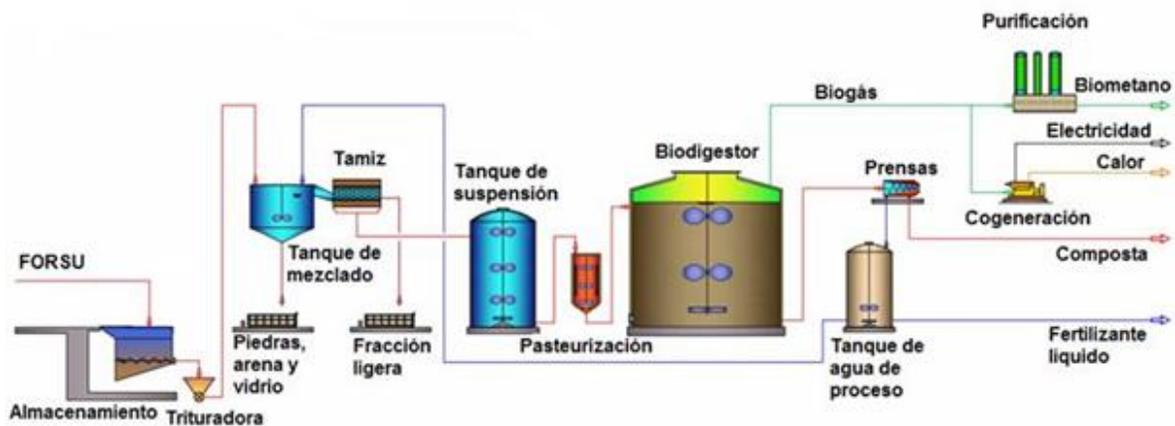


Figura 10. Esquema del proceso húmedo Ros Roca (Ros Roca SA, 2013).

El biodigestor es vertical de forma cilíndrica con un domo en la parte superior para almacenar todo el biogás producido. Posee un sistema de agitación inyectando una parte del biogás a través de tubos desde la parte superior, con lo cual se reduce el mantenimiento al no tener instrumentos de agitación al interior (Ros Roca SA, 2013).

El digestato producido, se dirige a un sistema de deshidratación por medio de centrifugas rotatorias y una solución polimérica que se añade antes de éstas para flocular los sólidos, facilitando la separación (Korz, 2010). El biogás recolectado

recibe un tratamiento para reducir la humedad y la cantidad de H<sub>2</sub>S, que depende del uso final de éste.

La mayoría de las plantas utilizan un sistema de cogeneración (electricidad y calor), a través de un motor tipo Otto. Generalmente, la planta consume todo el calor generado por la cogeneración, pero sólo una parte de la electricidad producida se utiliza en auto consumo y la restante es enviada a la red de electricidad (60% de la electricidad producida en la cogeneración) (Ros Roca SA, 2013). En la Tabla 5 se muestran algunas plantas que usan la tecnología Ros Roca como proceso.

Tabla 5. Características de las plantas más relevantes del proceso Ros Roca (Ros Roca SA, 2013).

<b>Característica de operación</b>	<b>Västeras, Suecia</b>	<b>Alicante, España</b>	<b>Ávila, España</b>
<b>Arranque</b>	2005	2007	2003
<b>Capacidad de la planta (t/año)</b>	23,000	52,000	72,000
<b>Producción de biogás (Nm<sup>3</sup>/t)</b>	100	125	120
<b>Producción de metano (Nm<sup>3</sup>/t)</b>	55	70	65
<b>Producción de energía eléctrica (kWh/t)</b>	195	220	190
<b>Consumo de energía eléctrica (kWh/t)</b>	15	12	20
<b>Tiempo de retención (d)</b>	20	19	20
<b>Sólidos Totales (%)</b>	12	10	15
<b>Temperatura de operación (° C)</b>	37	38	38
<b>Costo de inversión (\$USD año/t)</b>	375	535	556.5
<b>Referencias</b>	(Korz, 2010), (Ros Roca SA, 2013).		

### 3.10.1.4. Weltec

Weltec Biopower es una empresa formada en el año 2001 con sede en la ciudad alemana de Vechta, especializada en el tratamiento de residuos orgánicos para la generación de biogás (Weltec Biopower, 2008).

Las plantas de esta tecnología se caracterizan por tener una estructura modular y los biodigestores están constituidos por acero inoxidable, esto debido a la presencia de compuestos sulfurados y amoniacales que podrían dañarlos. En el interior del biodigestor se encuentran mezcladoras que tienen la función de homogeneizar el sustrato con los microorganismos en condiciones continuas y óptimas. Esto se aprecia en la Figura 11 (Weltec Biopower GmbH, 2012).

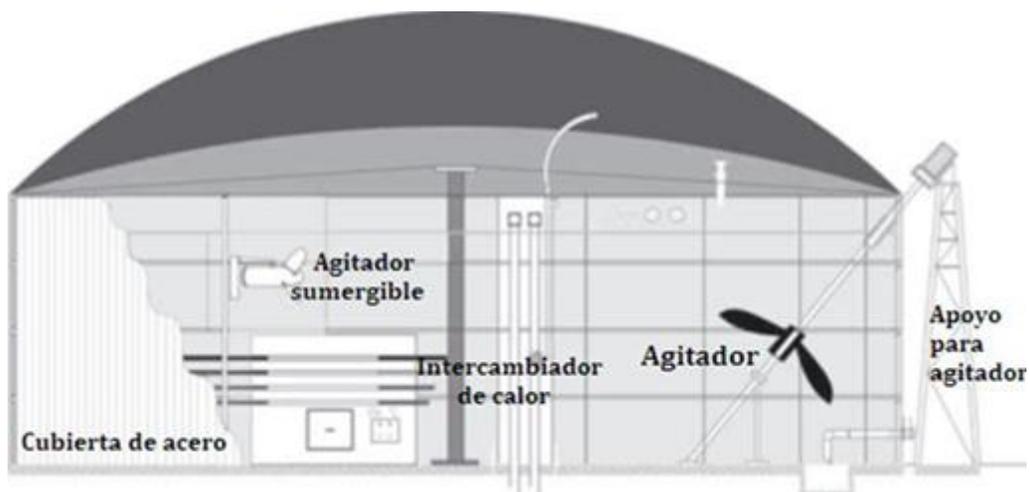


Figura 11. Biodigestor Weltec (Weltec Biopower GmbH, 2012).

La alimentación del sustrato se realiza por medio de un dosificador montado sobre las celdas de carga y conectado a un sistema transportador, y para garantizar que el sustrato digerido permanezca mezclado se bombea agua directamente al biodigestor a partir de un contenedor exterior. En cuanto al sustrato del biodigestor, este puede consistir de estiércol, residuos orgánicos de la industria alimentaria

(restos de comida, residuos de rastro, entre otros), el cual pasa por un triturador para reducir su tamaño de partícula a 1 cm aproximadamente. **Tabla 6** se muestran algunas plantas relevantes que utilizan la tecnología de Weltec en su proceso. En la **Tabla 7** Error! No se encuentra el origen de la referencia. se muestran las características típicas de operación de plantas que utilizan esta tecnología.

Tabla 6. Plantas de Referencia Weltec (Weltec Biopower GmbH, 2012).

<b>Localización</b>	<b>Capacidad del biodigestor (m3)</b>	<b>Energía generada (kW)</b>	<b>Año de inicio</b>	<b>Tipo de residuos</b>
<b>Bedfordshire, Reino Unido</b>	2 x 2500	800	2006	Residuos orgánicos y lodos
<b>Dorchester, Reino Unido</b>	2506	250	2012	Mezcla de residuos de alimentos
<b>Bakum, Alemania</b>	3040	6 x 265	2007	Residuos de alimentos

Tabla 7. Características de operación en promedio para las plantas de DA Weltec ((Weltec Biopower GmbH, 2012; Ramalho, 2013 ; Rapport *et al.*, 2008)

<b>Característica de operación</b>	<b>Promedio</b>
<b>Capacidad de las plantas (t/año)</b>	50,000-100,000
<b>Producción de biogás (Nm<sup>3</sup>/t)</b>	120
<b>Producción de metano (Nm<sup>3</sup>/t)</b>	72
<b>Producción de energía eléctrica (kWh/t)</b>	208
<b>Consumo de energía eléctrica (kWh/t)</b>	13
<b>Tiempo de retención (d)</b>	17
<b>Sólidos Totales (%)</b>	10
<b>Temperatura de operación (° C)</b>	55
<b>Costo de inversión (\$USD año/t)</b>	325

### 3.10.2 TECNOLOGÍAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA SECA

En este apartado se describen el proceso y las características de distintas tecnologías de DA seca con mayor relevancia en Europa como son Valorga, DRANCO (OWS), Kompogas y Bekon.

#### 3.10.2.1 Valorga

Valorga International es una compañía francesa filial de Grupo Urbaser (compañía española especializada en gestión y tratamiento de residuos) dentro de su división Urbaser Environment SAS desde 2005.

En el proceso Valorga los RSU son pretratados de forma eficiente para remover todos los materiales reciclables antes del proceso de digestión. Como se puede ver en la **Figura 12**, en esta fase se incluyen mecanismos de pulverización y clasificación, comenzando por un tanque que contiene un tromel de 6 pulgadas y otro con una malla de 2.4 pulgadas con cuchillas para rasgar las bolsas de plástico que aún contengan residuos, separadores magnéticos, y mesas de clasificación manuales operando en paralelo para separar los residuos reciclables de mayor tamaño (Valorga International SAS., 2007).

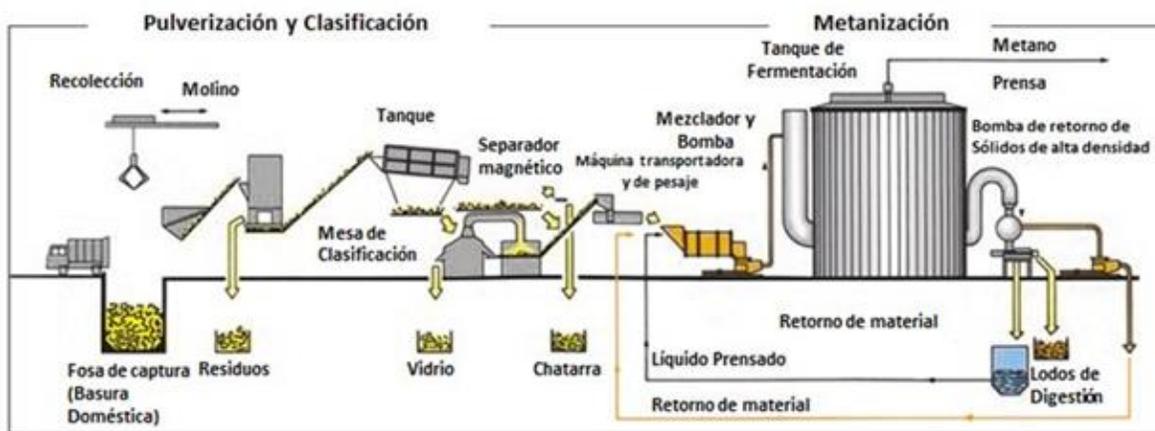


Figura 12. Esquema general de tratamiento de una planta con el proceso Valorga (Tomado de Valorga International SAS., 2007).

Los biodigestores Valorga presentan forma cilíndrica y vertical, contienen una mampara al interior que cubre aproximadamente 2/3 del diámetro del cilindro. Al mismo tiempo, los residuos se mezclan por medio de la recirculación del biogás presurizado como se observa en la **Figura 13**. Esta corriente inyecta biogás comprimido a 5 atmósferas de presión en el fondo de los biodigestores, donde hay aproximadamente 200 puntos de inyección (Valorga International SAS., 2007).



Figura 13. Esquema del biodigestor Valorga, las flechas amarillas indican la entrada y salida de los residuos, las flechas azules la salida y recirculación de biogás (Valorga International SAS., 2007).

La temperatura del biodigestor se mantiene en 37 °C (rango mesofílico), aunque también pueden operar en el rango termofílico sin requerir de modificaciones considerables. El volumen de los biodigestores se encuentra entre 2,000 y 4,500 m<sup>3</sup>, con una relación longitud sobre diámetro de 4 (Valorga International SAS., 2007). El tiempo de residencia varía de acuerdo a la cantidad de residuos alimentados que se encuentra desde 20 hasta 30 días.

La producción de biogás en promedio es de 100 Nm<sup>3</sup> por tonelada de alimentación al biodigestor. Su contenido es de 65 % de CH<sub>4</sub>, 35 % de CO<sub>2</sub> y 2,000 a 3,000 ppm de H<sub>2</sub>S, por lo que es necesaria una desulfuración biológica hasta 200 ppm antes de que el biogás sea utilizado para la cogeneración de energía eléctrica y calor. Una planta con este proceso produce en promedio 4 MW de energía eléctrica (Valorga International SAS., 2007).

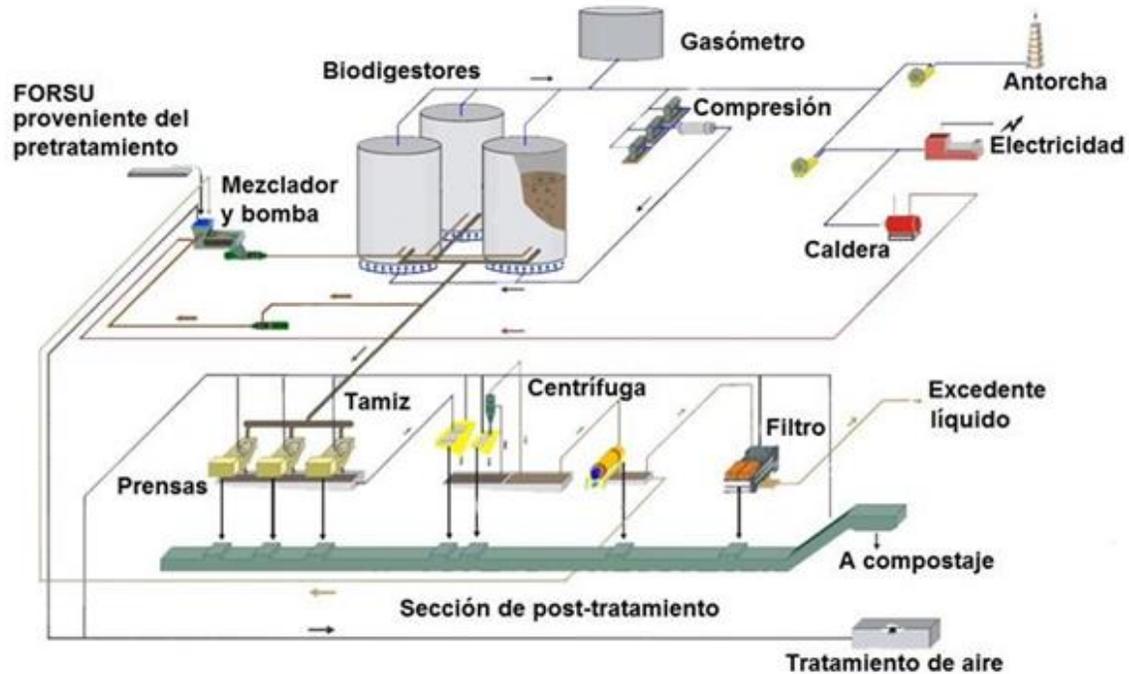


Figura 14. Esquema de la Planta de DA Ecoparc en Barcelona, España (Tomado de Valorga International SAS., 2007).

El post-tratamiento representa una parte significativa del proceso como se observa en la **Figura 14**. Esto se debe a que el efluente de cada biodigestor es deshidratado por medio de una serie de filtros-prensas para separar la fase líquida de la sólida. La fase líquida filtrada se lleva a dos secadoras centrífugas en serie; una parte de éste se utiliza para la dilución de la alimentación al biodigestor y otra se desecha (Valorga International SAS., 2007).

Los sólidos recuperados en los filtros-prensa y en las secadoras centrífugas reciben un tratamiento aerobio, el cual es realizado en túneles cerrados en presencia de oxígeno, a una temperatura de 40 °C durante un periodo de dos semanas (Valorga International SAS., 2007), esta etapa es necesaria para garantizar la estabilización total de la composta y así ser un producto utilizable por la industria agrícola. En la **Tabla 8** se da una lista de algunos ejemplos de plantas que utilizan la tecnología Valorga como proceso.

Tabla 8. Características de las plantas más relevantes del proceso Valorga (Valorga International SAS., 2007).

<b>Característica de operación</b>	<b>Hannover, Alemania</b>	<b>Amiens, Francia</b>	<b>Barcelona, España</b>
<b>Inicio de operación</b>	2005	1998	2004
<b>Capacidad de la planta (t/año)</b>	100,000	85,000	218,000
<b>Producción de biogás (Nm<sup>3</sup>/t)</b>	90	130	135
<b>Producción de metano (Nm<sup>3</sup>/t)</b>	55	69	75
<b>Producción de energía eléctrica (kWh/t)</b>	347	339	357
<b>Consumo de energía eléctrica (kWh/t)</b>	65	62	77
<b>Tiempo de retención (d)</b>	22	27	25
<b>Sólidos Totales (%)</b>	45	45	42.5
<b>Temperatura de operación (° C)</b>	38	37	35
<b>Costo de inversión (\$USD año/t)</b>	472	397	446
<b>Referencias</b>	(Tsilemou & Panagiotakopoulos, 2006)	(Valorga International SAS., 2007)	(Arsova, 2010)

### 3.10.2.2 DRANCO

Organic Waste Systems (OWS) es una compañía especializada en tratamientos biológicos de sustratos sólidos y semi-sólidos a través de tecnologías de DA. OWS fue fundada en 1988 en Ghent, Bélgica (Organic Waste Systems, 2013).

El proceso DRANCO consiste en una digestión con condiciones termofílicas de una sola etapa (**Figura 15**) seguida por otra etapa corta de maduración aerobia (compostaje). Para que se lleve a cabo la digestión, el tamaño de partícula de los residuos sólidos orgánicos debe reducirse a menos de 40 mm (De Baere, 2006). El proceso puede operar a altas concentraciones de materiales no biodegradables, sin embargo remover este tipo de materiales reduce el consumo de energía y la abrasión de los equipos (De Baere, 2006). El pretratamiento varía dependiendo de las condiciones y composición de los residuos que son tratados en cada planta.

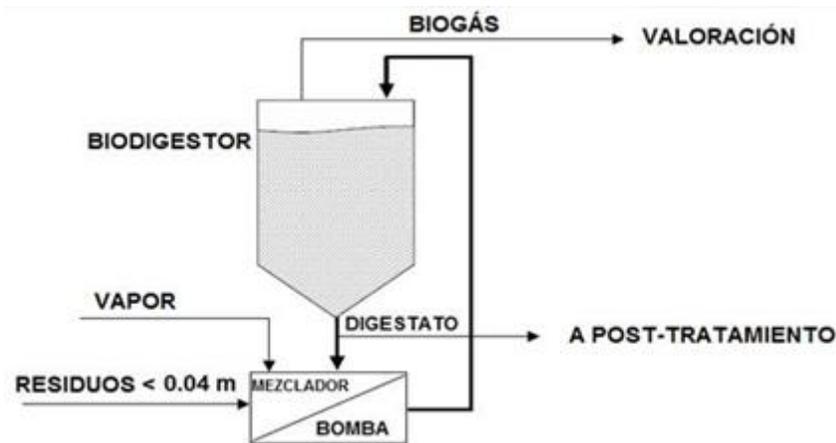


Figura 15. Esquema del proceso DRANCO (Organic Waste Systems, 2013).

Los residuos pretratados son mezclados posteriormente con una considerable cantidad de digestato proveniente de una recirculación del efluente del biodigestor. La relación de mezclado de residuo pretratado y de digestato recirculado es

aproximadamente de 1/6-8 toneladas; esto se lleva a cabo dentro de un mezclador donde se utiliza un sistema de inyección de vapor con el cual se eleva la temperatura a un intervalo entre 50 y 55 °C (De Baere, 2006).

La temperatura dentro del biodigestor se mantiene debido a que los residuos contienen altas concentraciones de ST y por lo tanto reducen las pérdidas de calor por convección, aunque debe estar aislado térmicamente para permitir que la temperatura sea constante durante varios días y no causar una alteración en el proceso bioquímico (De Baere, 2006).

Una vez que la corriente mezclada ingresa al biodigestor transcurren entre dos y cuatro días dependiendo de la velocidad de alimentación, para que ésta llegue al fondo, el descenso ocurre solamente por gravedad y no se utiliza ningún equipo de mezclado o inyección de biogás presurizado. El tiempo de retención en promedio es de 20 días (De Baere, 2006).

La mezcla precalentada de los residuos y el digestato recirculado se bombea hacia la parte superior del biodigestor a través de tres tubos que se insertan desde la parte inferior hasta llegar aproximadamente a 1 m del techo del biodigestor, estos tubos tienen un diámetro amplio (30 pulgadas), que permite minimizar la fricción y por tanto el consumo de energía en el bombeo (De Baere, 2006).

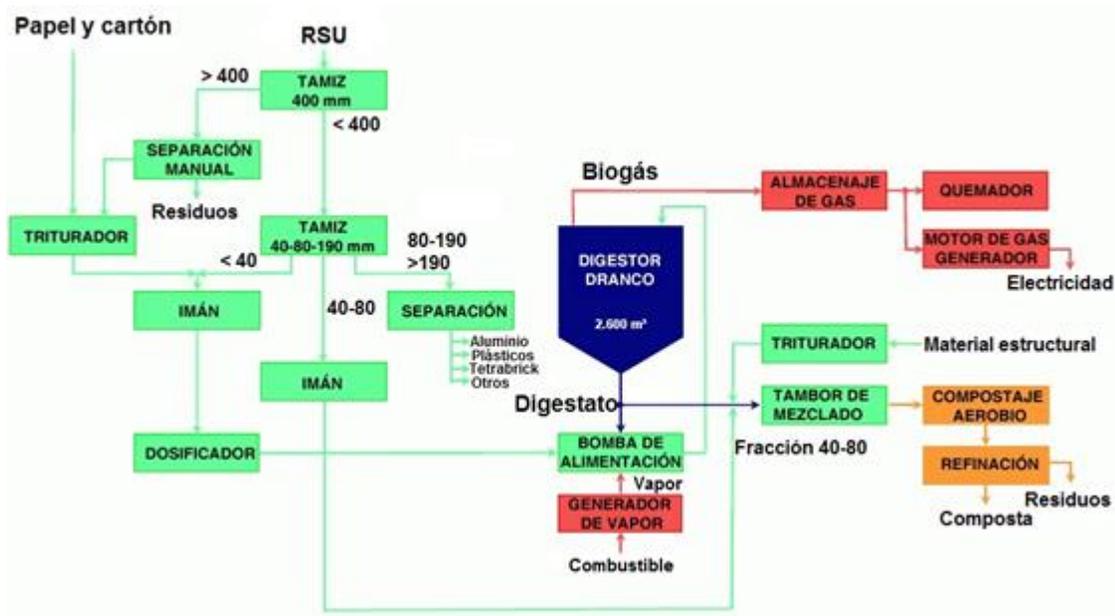


Figura 16. Diagrama del proceso DRANCO de la planta en Alicante, España (Organic Waste Systems, 2013).

El proceso DRANCO mostrado en la **Figura 16** puede operar a concentraciones de ST mayores de 45 % debido a que los residuos se mueven en dirección vertical a través del biodigestor desde la parte superior hasta el fondo. La operación con residuos de tales concentraciones permite una mayor producción de biogás, que es aproximadamente de 10 m<sup>3</sup> por cada m<sup>3</sup> de volumen ocupado en el biodigestor por día (De Baere, 2006). En la **Tabla 9** se muestran algunas plantas que usan la tecnología DRANCO dentro de su proceso de tratamiento de residuos.

Tabla 9. Características de las plantas más relevantes del proceso DRANCO (Organic Waste Systems, 2013).

<b>Característica de operación</b>	<b>Vitoria, España</b>	<b>Brench, Bélgica</b>	<b>Polsche-Heide, Alemania</b>
<b>Arranque</b>	2007	1992	2005
<b>Capacidad de la planta (t/año)</b>	134,250	26,000	100,000
<b>Producción de biogás (Nm<sup>3</sup>/t)</b>	134	108	113
<b>Producción de metano (Nm<sup>3</sup>/t)</b>	76	61	64
<b>Producción de energía eléctrica (kWh/t)</b>	328	344	370
<b>Consumo de energía eléctrica (kWh/t)</b>	62	67	74
<b>Tiempo de retención (d)</b>	26	23	25
<b>Sólidos Totales (%)</b>	45	40	48
<b>Temperatura de operación (° C)</b>	55	55	53
<b>Costo de inversión (\$USD año/t)</b>	226	508	583
<b>Referencias</b>	(Arsova, 2010)	(De Baere, 2006)	(Schulte, 2013)

### 3.10.2.3 Kompogas

Axpo Kompogas Ltd. es una compañía líder a nivel mundial en tecnología de DA seca, con experiencia en la planeación, diseño, construcción y operación de plantas para obtener energía a partir de la digestión de residuos orgánicos. La compañía Kompogas fue fundada en 1991 en Otelfingen, Suiza (Axpo Kompogas Ltd., 2012).

El proceso Kompogas es un sistema de una sola etapa, termofílico, seco y horizontal de flujo pistón, para producir energía utilizando residuos orgánicos (**Figura 17**). Estos residuos recolectados se depositan en un “búnker” (**Figura 18**, punto “1”) cuyo tamaño depende de la capacidad de la planta y el cual tiene instalados sensores

que registran los materiales orgánicos contenidos en cada descarga. Una vez descargados los residuos, una grúa se encarga de transportarlos a la siguiente etapa donde son triturados y filtrados. Este primer sistema en la planta permite una carga totalmente automática para poder tener una producción continua durante todo el año (Partl, 2007).

La trituradora (**Figura 18**, punto “2”) permite obtener un tamaño de partícula de 60 mm aproximadamente; las partículas más grandes son separadas a través de un filtro y regresadas al búnker para volver al proceso de trituración. Materiales inorgánicos o no degradables pueden tolerarse durante el proceso, sin embargo, si la cantidad de éstos es elevada, se recomienda que se añada una etapa de selección, ya sea manual o automática (Partl, 2007).

Después de la etapa de filtración los residuos ingresan al biodigestor por medio de bandas transportadoras. El biodigestor (**Figura 18**, punto “3”) opera a una temperatura constante de 55° C (controlada por un sistema de calentamiento en las paredes del biodigestor) con un tiempo de residencia de 14 días, lo que asegura una producción óptima y una pasteurización completa de los residuos (Partl, 2007).

El material de construcción del biodigestor puede ser de concreto o de acero (**Figura 17**) y está equipado con un agitador longitudinal que se desplaza lentamente para asegurar un mezclado óptimo y permitir que el biogás que se produzca escape del biodigestor con facilidad. Una parte del efluente del biodigestor se recircula y se mezcla con la alimentación para inocular y acelerar el proceso de digestión; al mismo tiempo se añade agua para asegurar un porcentaje óptimo de ST (Partl, 2007).

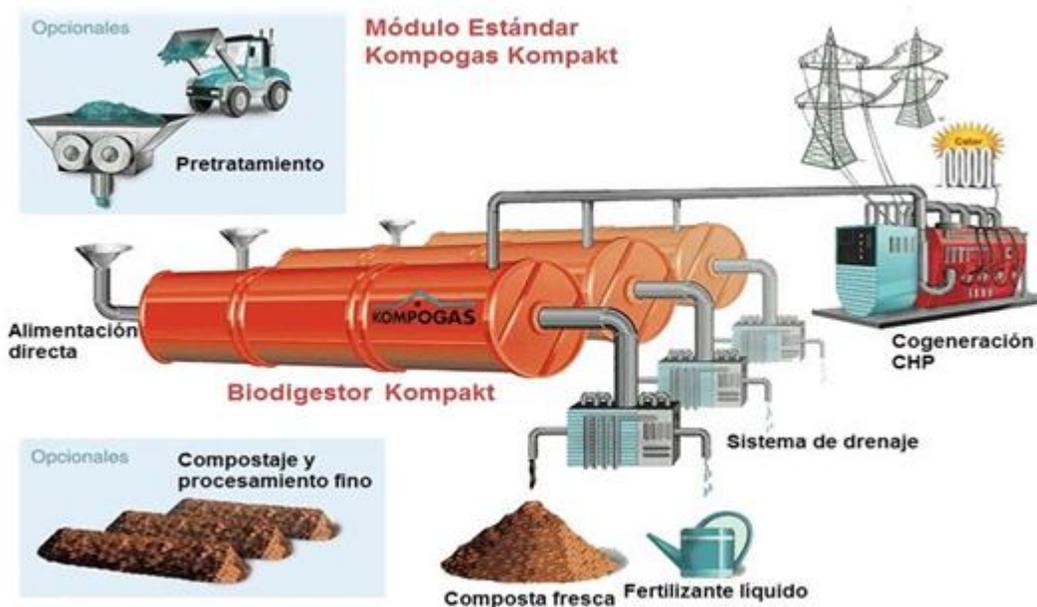


Figura 17. Esquema del proceso Kompostogas con biodigestor de acero (Axpo Kompostogas Ltd., 2012).

El biogás producido en el biodigestor se utiliza para generar calor y energía eléctrica en una unidad de cogeneración (CHP) mostrados en la **Figura 18**, punto “4”, aunque también puede tratarse para elevar el porcentaje de metano y así poder unirse a la red municipal de gas natural o utilizarse como combustible para automóviles. Una pequeña porción del calor y la electricidad generada se emplea en la misma planta para hacerla autosuficiente (Partl, 2007).

El digestato extraído del biodigestor se lleva a un filtro prensa (**Figura 18**, punto “5”) para separarlo en una fase sólida y otra líquida, donde la cantidad de ST de la fase sólida puede ajustarse directamente en el filtro prensa. Esta fase puede llevarse a una etapa de compostaje en túneles (**Figura 18**, punto “6”) con presencia de oxígeno para estabilizar el subproducto, mientras que la fase líquida puede ser utilizada directamente como fertilizante. El aire utilizado en los túneles es purificado

por medio de un “biofiltro” (**Figura 18**, punto “7”) para poder ser liberado al ambiente (Partl, 2007).

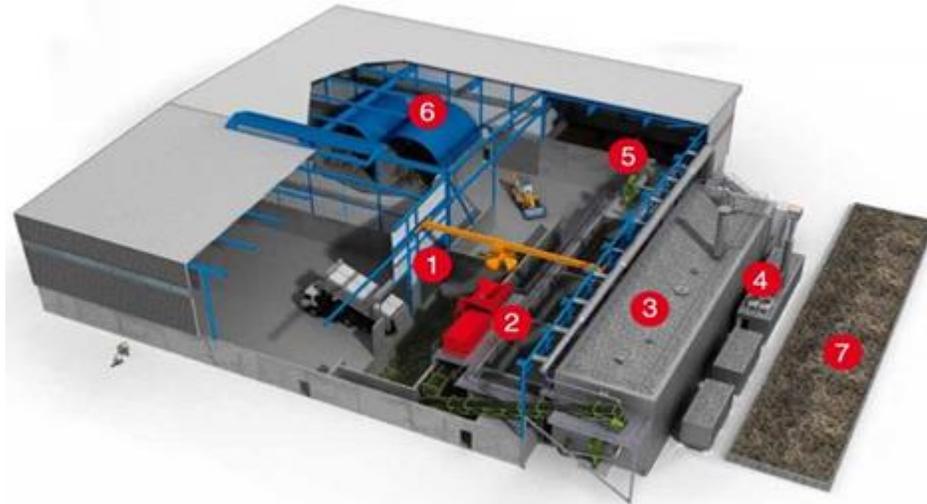


Figura 18. Secciones de una planta modular Kompogas con biodigestor de concreto (Axpo Kompogas Ltd., 2012).

En la **Tabla 10** se muestran las características de algunas plantas relevantes que utilizan la tecnología Kompogas para el tratamiento de residuos orgánicos.

Tabla 10. Características de las plantas más relevantes del proceso Kompogas en Suiza (Axpó Kompogas Ltd., 2012).

Característica de operación	Villeneuve	Lenzburg	Oftelfingen
Arranque	2006	2005	1996
Capacidad de la planta (t/año)	20,000	5,000	13,800
Producción de biogás (Nm <sup>3</sup> /t)	105	105	120
Producción de metano (Nm <sup>3</sup> /t)	68	58	72
Producción de energía eléctrica (kWh/t)	232	226	251
Consumo de energía eléctrica (kWh/t)	49	36	68
Tiempo de retención (d)	14	14	16
Sólidos Totales (%)	25.5	28	28
Temperatura de operación (° C)	57	57.5	55
Costo de inversión (\$USD año/t)	585	550	575
Referencias	(Partl, 2007)	(Axpó Kompogas Ltd., 2012)	(Partl, 2007)

#### 3.10.2.4 BEKON

BEKON Energy Technologies GmbH & Co. fue fundada en 1992 en Alemania. Esta compañía es líder en la planeación, diseño, construcción y operación de plantas de biogás por lotes para la generación de electricidad a partir de residuos orgánicos, principalmente de la FORSU (BEKON Energy Technologies, 2012).

El proceso seco de fermentación BEKON (**Figura 19**) es un proceso por lotes de una sola etapa que produce biogás a partir de residuos orgánicos con alto contenido de sólidos totales. No se requiere de ningún tipo de pretratamiento para la alimentación del sustrato al proceso, solo basta que los residuos orgánicos sean

recolectados por separado desde su fuente de origen. Inicialmente, la materia orgánica (hasta con un 50% de ST) se inocula con material orgánico digerido, después se comienza a llenar el fermentador a condiciones herméticas con la ayuda de trascabos. Una vez lleno, se asegura que el fermentador se encuentre herméticamente cerrado y sin oxígeno (Lutz, 2012).

La materia orgánica es inoculada continuamente a través de la recirculación de los lixiviados originados durante el proceso, que se dispersan sobre ésta desde el techo del digestor. Tampoco es necesaria la agitación de los residuos durante este proceso. La temperatura del proceso (mesofílica, 37° C) es controlada por medio de un sistema empotrado a las paredes y el suelo del fermentador, también por un intercambiador de calor que actúa como reserva al mantener la temperatura adecuada de los lixiviados recirculados (Lutz, 2012).

Las diferentes etapas de degradación ocurren en el mismo fermentador, lo cual tiene muchas ventajas en comparación con otros sistemas de Digestión anaerobia debido al bajo consumo de energía en el proceso y los bajos costos de mantenimiento (5 % de los costos de inversión).

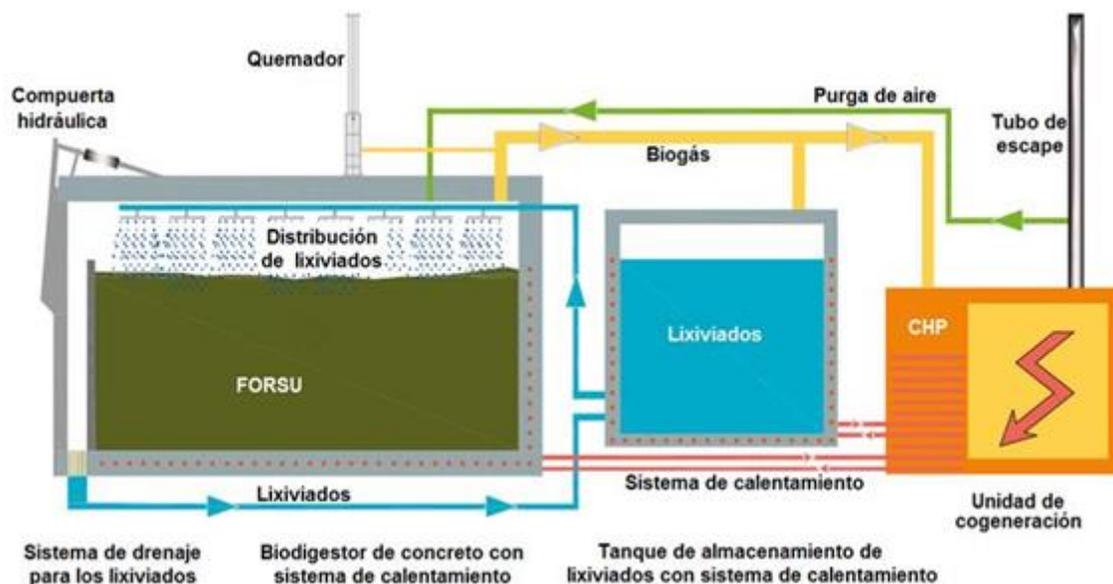


Figura 19. Esquema del proceso seco de fermentación BEKON (BEKON Energy Technologies, 2012).

Una vez terminado el proceso de fermentación (20 días aproximadamente) los fermentadores se vacían por medio de los trascabos y se llevan directamente a los campos de compostaje para lograr su estabilización y convertirse en fertilizante comerciable (Lutz, 2012).

En la **Tabla 11** se muestran algunas plantas relevantes que utilizan la tecnología de BEKON en su proceso. En la **Tabla 12** se muestran las características típicas de operación de plantas que utilizan esta tecnología.

Tabla 11. Características de las plantas más relevantes del proceso BEKON (BEKON Energy Technologies, 2012).

Localización	Capacidad (t/a)	Energía generada (kW)	Año de inicio
München, Alemania	25,000	570	2007
Saalfeld, Alemania	20,000	1,050	2007
Napoli, Italia	35,000	1,000	2011

Tabla 12. Características de operación en promedio para las plantas de DA de BEKON (Rapport *et al.*, 2008; Spin, 2011; Schulte, 2013).

<b>Característica</b>	<b>Promedio</b>
<b>Capacidad de las plantas (t/año)</b>	30,000
<b>Producción de biogás (Nm<sup>3</sup>/t)</b>	125
<b>Producción de metano (Nm<sup>3</sup>/t)</b>	75
<b>Producción de energía eléctrica (kWh/t)</b>	206
<b>Consumo de energía eléctrica (kWh/t)</b>	10
<b>Tiempo de retención (d)</b>	19
<b>Sólidos Totales (%)</b>	50
<b>Temperatura de operación (° C)</b>	37
<b>Costo de inversión (\$USD año/t)</b>	476

## 3.11 DIGESTIÓN ANAEROBIA EN MÉXICO

En México la digestión anaerobia se emplea como fuente de depuración o tratamiento de material orgánico, este tipo de tratamientos son implementados en:

- Tratamiento de aguas residuales.
- Tratamiento de estiércol en granjas
- Tratamiento de FORSU

### 3.11.1 *Tratamiento de agua residual*

Al término del año 2014 a nivel nacional, el número de plantas de tratamiento de agua residual registradas es de 2,526 instalaciones, de las cuales, 71 instalaciones (4% del total de las plantas de tratamiento de agua residual a nivel nacional) emplean sistemas anaerobios (CONAGUA, 2017)

### 3.11.2 *Tratamiento de estiércol en granjas*

De acuerdo con datos de la SAGARPA, hasta el 2007 se estima que existen entre 300 y 400 unidades productivas (fundamentalmente granjas porcinas y establos) que ya cuentan con biodigestores instalados y que son una demanda real e inmediata para la incorporación de motogeneradores para la producción de energía. Además entre 1,000 y 1,200 productores se han acercado a empresas relacionadas con los Mecanismos de Desarrollo Limpio, interesados en incorporar un biodigestor en sus instalaciones. (SAGARPA, 2007).

### 3.11.3 *Tratamiento de FORSU*

La Central Eléctrica de Biogás de Bioenergía de Nuevo León representa la primera experiencia a nivel nacional, sobre el aprovechamiento del biogás emitido por la basura dispuesta en rellenos sanitarios de Salinas Victoria, Nuevo León, para la generación de energía eléctrica.

A pesar de que los procesos y las tecnologías de digestión anaerobia para el tratamiento de FORSU y aprovechamiento de los subproductos (biogás) para la generación de energía eléctrica están plenamente probados, la complejidad de

aplicar este tipo de tecnologías está limitado por el entorno socio-político-económico. En la **Tabla 13** se mencionan algunas plantas que generan energía eléctrica mediante la degradación de la FORSU en procesos anaerobios.

Tabla 13. Plantas de DA para tratar la FORSU en México

<b>Ubicación</b>	<b>Tipo de tecnología</b>	<b>Proceso</b>	<b>Tipo de residuo</b>	<b>Capacidad de tratamiento [t/d]</b>	<b>Generación de energía eléctrica [kWh/d]</b>
<b>Atacomulco, Estado de México</b>	Digestor continuo	Digestión anaerobia seca, termofílica	Residuo sólido urbano	30	4,800
<b>Milpa Alta, Ciudad de México</b>	Digestor continuo	Digestión anaerobia húmeda, termofílica	Residuo sólido urbano	3.2	240
<b>Cuautitlán Estado de México</b>	Digestor continuo y digestor por lotes	Digestión anaerobia seca y húmeda, termofílica	Residuo sólido urbano	0.6	3.5

## 4. CASO DE ESTUDIO

El presente proyecto se realizó en las instalaciones de planta piloto de producción de biogás (3PBg), el cual, fue desarrollado por la Facultad de Química de la UNAM, con el objetivo de tratar la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, en el marco del proyecto “BioGas-CEAR/07/2016. “CEMIE-Clúster Biocombustibles Gaseosos” en la Acción Estratégica 2 (AE2): producción de metano por digestión y co-digestión, FORSU y lodos de purga.

En el desarrollo de este proyecto, la 3PBg pasó por cuatro diferentes etapas de operación (ver Tabla 14), Siendo la etapa 3 la más estable para la operación de la planta, esto debido al suministro constante de material orgánico por parte del municipio de Naucalpan de Juárez, Estado de México. Por esta razón, se consideró la etapa 3 para el desarrollo de este documento de tesis.

Tabla 14. Etapas de operación de la 3PBg

<b>Etapa</b>	<b>Descripción de la etapa</b>	<b>Procedencia de la FORSU.</b>
<b>1</b>	Arranque de la planta piloto de digestión anaerobia húmeda y seca	Central de abastos del municipio de Tultitlán, Estado de México.
<b>2</b>	Estabilización de la planta piloto de digestión anaerobia húmeda y seca	Central de abastos del municipio de Tultitlán, Estado de México.
<b>3</b>	Operación en continuo de la planta piloto de digestión anaerobia	FORSU procedentes del municipio de Naucalpan de Juárez, Estado de México.
<b>4</b>	Evaluación de la influencia del tipo de FORSU en la producción de biogás	Central de abastos del municipio de Tultitlán, Estado de México.

La 3PBg fue construida en 2015, con el fin de realizar estudios de producción de biogás utilizando la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU),

por medio del proceso de digestión anaerobia (DA). La planta piloto se encuentra dividida en las siguientes secciones: 1) Pretratamiento, 2) Servicios auxiliares, 3) Tratamiento de agua residual, 4) Digestión húmeda, 5) Digestión seca, 6) Almacenamiento y tratamiento de biogás, 7) Generación de energía eléctrica y, 8) Área de control.

En la primera sección se realiza la recepción, molienda, trituración y mezclado con agua de los residuos orgánicos recibidos; en la segunda sección se preparan y dosifican los reactivos necesarios en el proceso de digestión anaerobia, además, se encuentran el sistema de suministro de agua y el sistema de calentamiento de los digestores; en la tercera sección se lleva a cabo el tratamiento de lixiviados de los digestores anaerobios secos y el agua residual proveniente de la deshidratación del exceso de digestado extraído del digestor anaerobio húmedo; en la cuarta sección se encuentra el reactor de digestión húmeda, con capacidad de 25 m<sup>3</sup> y de una altura de 3.6 m; en la quinta sección se encuentran tres reactores de digestión anaerobia seca (no hay adición de agua), cada uno de una capacidad de 3 m<sup>3</sup>; la sexta sección consiste de un sistema de acumulación de condensados y de dos unidades de reacción química con un material ferroso para la remoción de sulfuro de hidrógeno del biogás; la séptima sección consiste en el proceso de generación eléctrica y en la octava sección se encuentra el centro de control de motores (CCM) y el panel de control de la planta

La planta piloto cuenta con reactores diseñados para la implementación de las tecnologías de digestión anaerobia húmeda y seca, en secciones independientes. En ambos tipos de reactores se llevan a cabo los procesos de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Para el caso de la digestión anaerobia húmeda, se utiliza un digestor con agitación continua, y para el caso de la digestión seca se emplean tres digestores por lotes, sin agitación.

Por diseño, la 3PBg tiene una capacidad de tratamiento de FORSU de 600 kg al día, 500 kg en el reactor de digestión anaerobia húmeda y 100 kg por día entre los

tres reactores de digestión seca. La planta está diseñada para operar 360 días al año y 24 horas por día.

En la **Figura 20** se muestra la 3PBg, donde se llevan a cabo las pruebas de digestión anaerobia.



Figura 20. Planta de producción de biogás (3PBg) de la UNAM.

## 4.1 UBICACIÓN DE LA PLANTA PILOTO

La planta piloto se encuentra instalada a un costado de la Clínica Universitaria de Salud Integral (CUSI) Almaraz, terreno propiedad de la Facultad de Estudios Superiores (FES) Iztacala. La CUSI Almaraz está localizada en Av. Jiménez Gallardo SN, San Sebastián Xhala km 2.5, Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México, de acuerdo con la **Figura 21**.

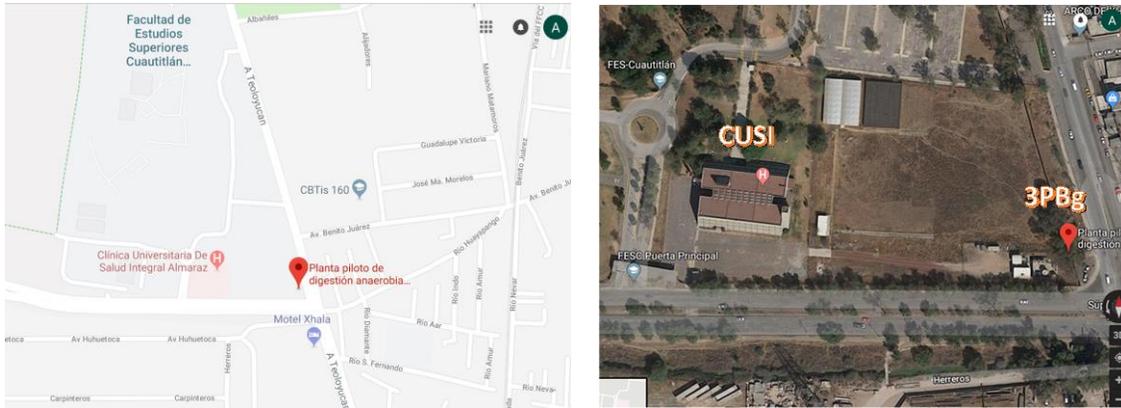


Figura 21. Vistas de ubicación de la planta piloto de producción de biogás desde la aplicación (Googlemaps, 2013).

## 4.2 LOCALIZACIÓN Y COLINDANCIAS

El municipio de Cuautitlán Izcalli es uno de los 125 municipios del Estado de México y se ubica al noroeste del Valle de México, en la porción centro - oeste del Estado de México, con las siguientes coordenadas geográficas extremas: latitud máxima 19°43'56" y latitud mínima 19°35'05", longitud máxima 99°17'25" y longitud mínima 99°10'32", con una altitud media sobre el nivel del mar de 2,250 m. Cuenta con una superficie total de 42.50 km<sup>2</sup>. Sus colindancias son al norte con los municipios de Teoloyucan y Zumpango, al oeste con Tepetzotlán y Cuautitlán Izcalli, al sur con Tultitlán y al este con Tultepec, Melchor Ocampo y Nextlalpan. Por su cercanía a la Ciudad de México, el municipio se ha integrado al área conurbada de la Ciudad de México.

## 4.3 CONDICIONES METEOROLÓGICAS

En términos generales, el clima en el municipio de Cuautitlán Izcalli es templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media en un 30.60% de la superficie territorial y templado subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad en un 69.40% de la superficie municipal

Cuenta con la temperatura promedio propia del clima templado subhúmedo cuya variación máxima alcanza los 27.8° C y como mínima de 5° C, la media anual se ubica en los 16° C. El régimen pluvial medio anual oscila de 600 a 800 mm, y los principales meses de precipitación son: junio, julio, agosto y septiembre.

Existen importantes corrientes superficiales y cuerpos de agua, entre las primeras: el Río Cuautitlán que atraviesa el territorio municipal con una longitud de 10.98 km, el Río Hondo de Tepetzotlán tiene como principales afluentes los arroyos Chiquito, Lanzarote y el Ocote y que sirve como límite entre este municipio y el de Tepetzotlán. Los principales cuerpos de agua son: el embalse Espejo de los Lirios; Bordo la Piedad; Presa el Ángulo; Laguna de Axotlán, y la Presa Lago de Guadalupe.

En la **Tabla 15** se presenta a manera de resumen los principales datos atmosféricos y climatológicos del municipio Cuautitlán Izcalli, lugar de instalación de la planta piloto de DA para tratamiento de la FORSU.

Tabla 15. Datos climatológicos en Cuautitlán Izcalli (SMN,2013)

<b>Datos atmosféricos</b>	
<b>Altitud</b>	2,250 msnm
<b>Presión</b>	0.76 atm
<b>Temperatura</b>	
<b>Máxima extrema</b>	32.5°C
<b>Máxima promedio anual</b>	27.8°C
<b>Mínima extrema</b>	5.0°C
<b>Mínima promedio anual</b>	16.0°C
<b>Humedad relativa</b>	69.40%
<b>Precipitación pluvial</b>	
<b>Precipitación anual máxima</b>	800 mm
<b>Región sísmica</b>	
<b>Zona</b>	B (intermedia)

## 4.4 CAPACIDAD Y FLEXIBILIDAD

La planta piloto de DA opera 360 días al año, 24 horas al día y tiene una capacidad máxima de 600 kilogramos al día de alimentación de FORSU, los residuos son recolectados de la central de abastos de Tultitlan, Estado de México.

La planta cuenta con un control semi-automático, ya que es imprescindible el recurso humano en ciertas secciones del proceso que necesitan evaluarse mediante análisis en laboratorio, de tal forma que sea posible obtener información valiosa y escalable bajo el marco de protocolos de investigación.

## 5.METODOLOGÍA

La metodología empleada para determinar el potencial de generación de biogás de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) a través del proceso de digestión anaerobia húmeda se desarrolló en cuatro etapas.

- I. Análisis de laboratorio
- II. Caracterización de FORSU.
- III. Operación de la 3PBg.
- IV. Evaluación económica.

### 5.1 ANÁLISIS DE LABORATORIO:

En esta etapa se realizó pruebas de potencial bioquímico de metano (PBM). Esta prueba se realiza para determinar la biodegradabilidad anaerobia de los residuos y, con ello, evaluar su potencial de tratamiento para la producción de máxima biogás. Los resultados generados por esta prueba son la base para definir la tratabilidad de los sustratos de mercados y tianguis y de tipo domiciliario por medios anaerobios.

Las pruebas se realizaron por triplicado y montaron en el equipo Automatic Methane Potential Test System (AMPTS por sus siglas en inglés) utilizando una relación en masa de 2:1, dos partes de Sólidos Volátiles (SV) por una parte de inóculo, en digestores de vidrio de 500 mL sellados herméticamente e inertizados con gas nitrógeno para garantizar condiciones anaerobias, a cada uno de los digestores de vidrio se adiciono agregó 12 mL de solución basal con micronutrientes descrita en la **Tabla 16** Este medio está basado en el reportado por Angelidakiy Sanders (2004).

Tabla 16. Medio de cultivo basal

<b>Solución A (100X)</b>	
<b>Reactivo</b>	<b>Cantidad (g)</b>
NH <sub>4</sub> Cl	100
CaCl·2HO	5
MgCl·6H <sub>2</sub> O	10
NaCl	10
Agua destilada	cbp 1 L
<b>Solución B (500X)</b>	
<b>Reactivo</b>	<b>Cantidad (g)</b>
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ·3H <sub>2</sub> O	200
Agua destilada	cbp 1 L
<b>Preparación del medio basal</b>	
<b>Solución</b>	<b>Cantidad</b>
A	10 mL
B	2 mL
Sustrato	5 g DQO <sup>a</sup>
NaHCO <sub>3</sub>	<sup>b</sup>
Agua destilada	cbp 1 L

En la **Figura 22** se muestran el equipo AMPTS empleado en las pruebas de PBM.



Figura 22. Equipo: Automatic Methane Potential Test System (AMPTS)

## 5.2 CARACTERIZACIÓN DE FORSU

El estudio de caracterización de los residuos orgánicos procesados en la 3PBg consistió en dos tipos de determinaciones, una de tipo físico (caracterización física) en la cual se pesa cada uno de los componentes identificables visualmente en la muestra, y otro de tipo fisicoquímico para los cuales las muestras son procesadas en el laboratorio para determinar el porcentaje de los diferentes componentes estructurales que la integran.

### 5.2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA

En la caracterización física de las muestras de residuos orgánicos se determinó el porcentaje de los diferentes subproductos que las componen, de acuerdo a lo establecido en las NMX-AA-015-1985, NMX-AA-019-1985 y NMX-AA-022-1985. Estas determinaciones se realizaron en las instalaciones de la 3PBg.

El procedimiento empleado para determinar los subproductos de los residuos orgánicos tratados en la 3PBg se basó en 9 pasos: 1) Recepción de los residuos sólidos orgánicos; 2) peso del residuo orgánico; 3) registro de las cantidades de residuo orgánico suministrados; 4) depósito de residuos orgánicos en la plancha del área de pretratamiento, esto con la finalidad de sacar el contenido de los empaque y bolsas; 5) mezcla del sustrato hasta que visualmente se vea una mezcla homogénea, esto con la finalidad de garantizar que el sustrato se encuentre bien distribuido en la mezcla; 6) división de la mezcla de material orgánico en cuatro partes aproximadamente iguales 1, 2, 3 y 4 y eliminar las partes opuestas 1 y 2 ó 3 y 4 (**Figura 23**); 7) determinación del peso específico de los residuos orgánicos suministrados(aplicando la Norma Mexicana NMX-019-1985); 8) Las partes no eliminadas en el primer cuarteo se vuelven a mezclar, a continuación, se divide en cuatro partes aproximadamente iguales 1, 2, 3 y 4, y se eliminan las partes opuestas

1 y 2 ó 3 y 4, repitiendo esta operación hasta dejar un mínimo de 50 kg de residuos sólidos con los cuales se debe hacer la selección de subproductos; 9) selección y pesaje de los subproductos a partir de los 50 kg seleccionados. En la **Figura 24** se muestran los pasos empleados en la caracterización física de la FORSU.

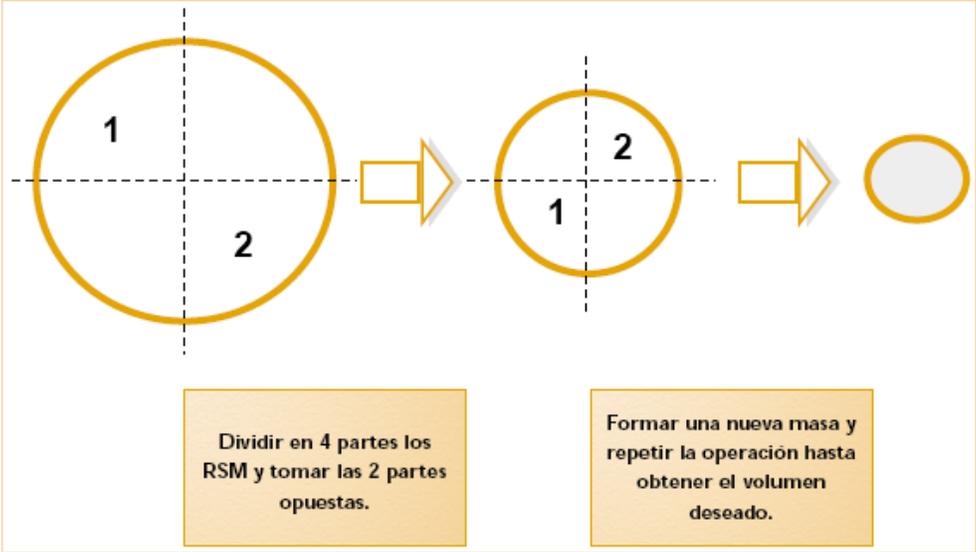


Figura 23. Método de Cuarteo



Figura 24. Procedimiento para la determinación de subproductos de los distintos sustratos

## 5.2.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA FORSU Y DEL DIGESTATO

Los parámetros que se determinan de forma común en la mayoría de los trabajos encaminados a utilizar la FORSU como sustrato para la digestión anaerobia son: sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), así como, DQO, nitrógeno amoniacal (NA) y fósforo total (PT). Estas características son utilizadas para determinar de forma preliminar el contenido de materia biodegradable y la relación de nutrientes contenidos en la FORSU. La composición elemental de los residuos es de gran importancia para evaluar la recuperación de sus nutrientes, además permite estimar valores teóricos de producción de biogás (Buffiere et al., 2006). En la **Tabla 17** se presentan los métodos analíticos usados en la caracterización fisicoquímica de la

FORSU e inóculo. Estas determinaciones permitieron dar seguimiento a la estabilización y operación del sistema de digestión húmeda de la 3PBg.

Tabla 17. Métodos analíticos

Parámetro	Método
1 Ácidos grasos volátiles totales (AGV)	Titulación en retroceso de pH 4 a 7 con NaOH 0.1 N de la muestra acidificada a pH 3.3, centrifugada y el sobrenadante puesto en ebullición (DiLallo y Albertson, 1961)
2 Alcalinidad parcial (AP) e intermedia (AI)	Titulación con ácido sulfúrico 0.1 N de pH de la muestra hasta pH de 5.75 para AP y de 5.75 a 4.3 para AI (Pérez y Torres, 2008)
3 DQO	Digestión por reflujo cerrado a 150°C con reactivos preparados, lectura a 600 nm (APHA, 5220-D).
4 Fósforo total (PT)	Digestión ácida con ácido sulfúrico y ácido nítrico (APHA, 4500-P B 4). Método colorimétrico del ácido vanadomolibdofosfórico a 470 nm (APHA, 4500-P C)
5 Humedad	Gravimetría, se obtiene por diferencia entre la masa inicial y los sólidos totales determinados (APHA, 2540 B)
6 índice alfa ( $\alpha$ )	Relación de alcalinidades $\alpha = AP / (AP + AI)$ (Pérez y Torres, 2008)
7 Nitrógeno Kjeldahl (NK)	Titulación. Digestión ácida con catalizador de selenio por el método de Wieninger (Merck, 2009) y posterior neutralización, destilación y titulación con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.02N (APHA, 4500-NH <sub>3</sub> C y 4500-NH <sub>3</sub> E)
8 N-NH <sub>4</sub>	Destilación y titulación con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.02N (APHA, 4500-NH <sub>3</sub> C y 4500-NH <sub>3</sub> E)
9 Sólidos totales (ST)	Gravimetría. Sólidos secados a una temperatura de 103 a 105°C (APHA, 2540-B)
10 Sólidos volátiles (SV) y fijos (SF)	Gravimetría. Sólidos previamente secados a 103-105°C e incinerados a 550°C (APHA, 2540-E)

Para este caso de estudio, la determinación de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), sólidos fijos (SF) y humedad de la FORSU, y la relación alfa (grado de amortiguamiento del inóculo dentro del reactor anaerobio húmedo) se realizó en el

laboratorio móvil de la planta, el cual está ubicado a un costado de la planta piloto (Ver **Figura 25**). Sin embargo, debido a la falta de reactivos, material y equipo en el laboratorio de la planta, la determinación de la demanda química de oxígeno DQO, nitrógeno amoniacal, fósforo total, ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad, así como las pruebas de determinación del Potencial Bioquímico de Metano (PBM) se realizaron en el laboratorio 301 del Conjunto “E” de la Facultad de Química de la UNAM.



Figura 25. Laboratorio semi fijo de la 3PBg.

### 5.3 OPERACIÓN DE LA PLANTA PILOTO

En esta sección se describe de forma general las actividades realizadas durante la operación de la 3PBg. Es importante mencionar que las actividades realizadas en cada área se basaron en el manual de operación de la planta.

La 3PBg está dividida en las siguientes áreas:

- i) Pretratamiento,
- ii) Servicios auxiliares
- iii) Tratamiento de agua residual
- iv) Digestión húmeda.
- v) Digestión seca,
- vi) Almacenamiento y tratamiento de biogás, generación de energía eléctrica.
- vii) Y área de control.

En la **Figura 26** y **Figura 27** se muestra la distribución de áreas en la planta piloto de digestión anaerobia.

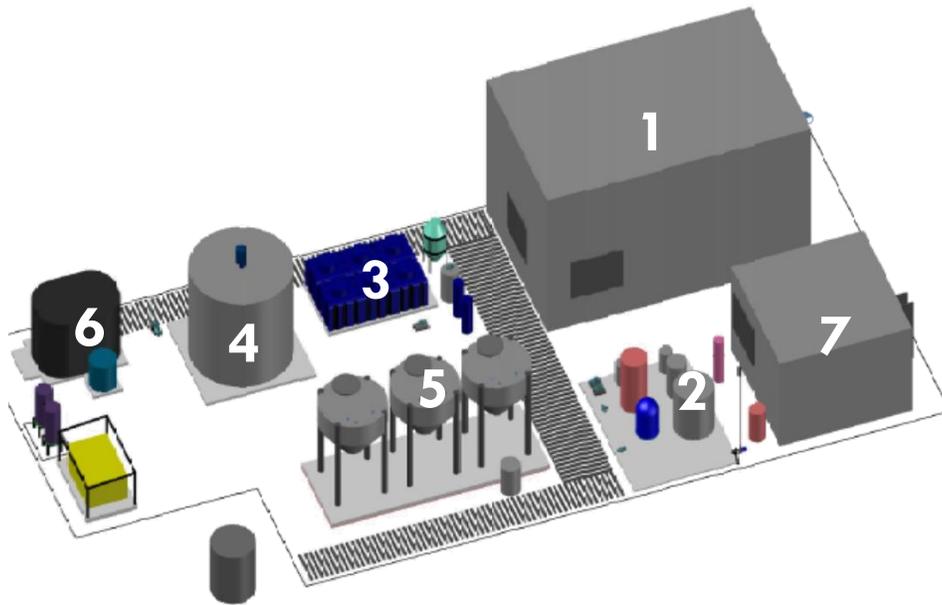


Figura 26. Distribución de áreas en la 3PBg

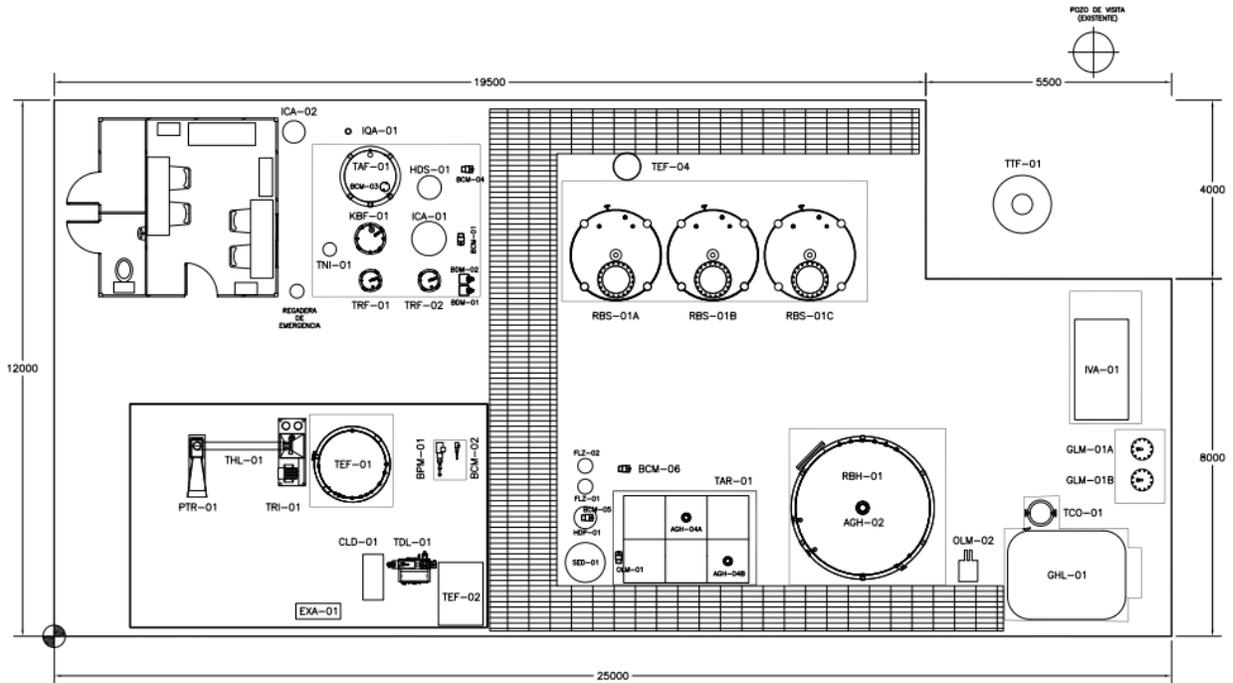


Figura 27. Plano de distribución de equipos en 3PBg.

### 5.3.1. PRETRATAMIENTO

En esta área la FORSU suministrada se procesa y prepara de acuerdo a las condiciones del proceso de digestión anaerobia a emplear. Las acciones realizadas en esta área se mencionan a continuación:

- I. Pesar y registrar: Cada uno de los contenedores (tambos de 200 litros) donde se recolectó y transportó el residuo hacia la planta se pesa, esto con la finalidad de conocer la cantidad de residuo que ingresa a la planta.
- II. Caracterización física de la FORSU: Determinación de los subproductos que conforman el residuo suministrado, esto se realizó con base en las normas mexicanas NMX-AA-015-1985, NMX-AA-019-1985 y NMX-AA-022-1985.
- III. Selección y molienda del material orgánico susceptible a tratamiento: Debido a que el residuo suministrado a la planta tiene una importante presencia de materiales orgánicos (huesos de gran tamaño, jardinería, etc...) e

inorgánicos (plástico, metales, papel, etc...) no deseable en el proceso de Digestión Anaerobia. Por tal motivo, dichos materiales son removidos manualmente antes de la trituración, esto con la finalidad de evitar afectaciones a equipos de proceso (trituradores, bombas, agitadores, deshidratador). El pretratamiento la FORSU para el sistema de digestión anaerobia húmeda consiste en reducción de tamaño de partícula a 5 milímetros y un porcentaje de 10% de sólidos totales (ST), el cual, se logra con la adición de agua (agua potable ó agua residual tratada recirculada del proceso).

- IV. Tomas de muestra: Se realiza tomas de muestra de la FORSU triturada en cada periodo de alimentación. Dichas muestras son envasadas y transportadas al laboratorio 301 del conjunto "D" de la Facultad de Química de la UNAM, en Ciudad Universitaria en donde se realizó la caracterización química de la FORSU, así como determinación de pruebas de Potencial Bioquímico de Metano (PBM). Además, para el caso de la digestión húmeda se realizan tomas de muestra de la FORSU diluida para determinar el pH, en el caso de que el valor de pH sea inferior a 7 se adiciona bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) hasta alcanzar un pH neutro, esto con la finalidad de garantizar las condiciones de alimentación adecuadas para este tipo de sistema.
- V. Alimentación: La mezcla de FORSU y agua, con pH controlado en un rango de 6.5 a 7, se envía al reactor anaerobio húmedo (RBH-01) mediante una bomba de cavidad progresiva (BPM-01) que se encuentra en esta área.
- VI. Deshidratación de lodo: Los lodos procedentes del sistema de digestión húmeda son procesados en el deshidratador, esto con la finalidad de separar el material orgánico suspendido en el lodo y el agua residual es enviada a la planta de tratamiento de agua, en donde se purifica para su posterior reúso en esta área.

En la **Tabla 18** se mencionan los equipos que se encuentran instalados en área de pretratamiento.

Tabla 18. Equipos instalados en el área de Pretratamiento.

<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>
<b>TRI-01</b>	Triturador
<b>THL-01</b>	Tornillo helicoidal
<b>PTR-01</b>	Pretritador
<b>BPM-01</b>	Bomba de alimentación a biodigestor húmedo
<b>BCM-02</b>	Bomba de alimentación a tratamiento de agua
<b>DLT-01</b>	Deshidratador de lodos
<b>TEF-01</b>	Tanque de Homogenización

En la **Figura 28** se muestran los equipos empleados en el pretratamiento de la FORSU.



Figura 28. Equipos instalados en el área de pretratamiento.

### 5.3.2. ÁREA DE SERVICIOS AUXILIARES

Esta área lo conforman servicios indispensables en la operación diaria de la 3PBg, estos servicios son: Almacenamiento y suministro de agua; Sistema de calentamiento; Sistema de solución de bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ); y sistema de solución de polímero. Durante la operación de la 3PBg se realizaron las siguientes actividades en esta área:

- I. Almacenamiento y suministro de agua: El agua es indispensable para la operación diaria de la 3PBg. Sin embargo, la planta no cuenta con una línea directa de suministro propia y por lo tanto, el agua se obtiene de la Clínica Universitaria de Salud Integral (CUSI) Almaraz, a través de la bomba Centrífuga BCM-07 y se envía al Tanque de Almacenamiento de Agua Potable (TAF-01). La operación de llenado del tanque de almacenamiento de agua se realiza todos los días con esto se garantiza el suministro de agua para la operación de la 3PBg. El suministro de agua a los distintos sistemas de la planta se realiza a través de un equipo hidroneumático (HDS-01), el cual sirve para mantener la presión de agua constante en la red de distribución.
- II. Preparación y suministro de disolución de bicarbonato de sodio: Para mantener el control del pH de la mezcla de FORSU-agua (10% de ST) almacenada temporalmente en el tanque de homogenización (TEF-01) antes de ser alimentado al reactor húmedo, así mismo, la disolución de bicarbonato se emplea para controlar el pH del digestor anaerobio húmedo RBH-01. La disolución de bicarbonato de sodio al 6% se prepara en el tanque de disolución de bicarbonato de sodio (TRF-01) y se suministra empleando la bomba dosificadora de bicarbonato de sodio (BDM-01). Es importante señalar que la preparación de la disolución de bicarbonato de sodio se emplea en el control del pH del digestor húmedo cuando el pH de este es inferior a 7. Sin embargo, durante la operación de la 3PBg no se ha requerido emplear este sistema ya que el pH del lodo dentro del digestor húmedo se ha mantenido por arriba de 7.
- III. Preparación y suministro de disolución de polímero: La disolución de polímero se realiza en el tanque de disolución de polímero (TRF-02) y se suministra con la bomba dosificadora de polímero (BDM-02). La disolución de polímero tiene la función de coagular y flocular el material orgánico disuelto en el lodo (sub producto de la degradación anaerobia húmeda) y ayuda en el proceso de deshidratación de lodos procedentes del digestor

húmedo. Esta operación se realiza cada vez que se alimenta el digestor húmedo.

- IV. Sistema de calentamiento: Este sistema es fundamental en el proceso de digestión, ya que permite mantener la temperatura apropiadas al interior de los digestores (35°C) para el desarrollo adecuado de los microorganismos anaerobios y por lo tanto, maximizar la transformación de los sustratos en productos (biogás). Para garantizar el suministro y la temperatura adecuada del agua en el sistema de calentamiento se realizaron las siguientes actividades: Verificar que la temperatura del calentador de agua de proceso (ICA-01) sea de 47°C, ya que con esta temperatura se logra una temperatura de 35°C al interior de los digestores, el envío del agua de calentamiento es a través la bomba centrífuga BCM-02; Verificar el nivel del tanque de almacenamiento de agua caliente (KBF-01) y en el caso de ser necesario reponer el faltante con agua; Verificar el nivel de gas LP, el cual es el combustible empleado en el sistema de calentamiento.

En la **Tabla 19** se mencionan los equipos que se encuentran instalados en área.

Tabla 19. Equipos instalados en el área de servicios auxiliares.

<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>
<b>TAF-01</b>	Tanque de almacenamiento de agua potable
<b>HDS-01</b>	Hidroneumático de servicios (BCM-04)
<b>KBF-01</b>	Tanque de almacenamiento de agua caliente
<b>ICA-01</b>	Calentador de agua para proceso
<b>TRF-01</b>	Tanque de disolución de bicarbonato de sodio
<b>TRF-02</b>	Tanque de disolución de polímero
<b>TNI-01</b>	Tanque de nitrógeno de inertización
<b>ICA-02</b>	Calentador de agua de servicios
<b>BCM-03</b>	Bomba de alimentación a HDS-01
<b>BCM-04</b>	Bomba de recirculación de lixiviados
<b>AGH-01</b>	Agitador de disolución bicarbonato de sodio
<b>AGH-03</b>	Agitador de disolución de polímero
<b>BCM-01</b>	Bomba de alimentación a calentador de agua
<b>BDM-01</b>	Bomba dosificadora de bicarbonato de sodio
<b>BDM-02</b>	Bomba dosificadora de polímero
<b>IQA-01</b>	Quemador de biogás

En la **Figura 29** se muestran los equipos empleados en el pretratamiento de la FORSU.



Figura 29. Equipos instalados en el área de servicios auxiliares

### 5.3.3. TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

La planta de tratamiento de agua residual (TAR-01) es un equipo paquete que está conformado por varios equipos que operan en forma secuencial para completar el tratamiento del agua residual procedente de la deshidratación de lodos del digester húmedo, así como el exceso de lixiviados de los digestores secos, esto con la finalidad de obtener agua tratada que cumpla con la norma NOM-002-SEMARNAT-1996 (descarga de agua residual a alcantarillado), además de incorporarla al proceso como agua de dilución. Las acciones realizadas en esta área se mencionan a continuación:

- i. Envío de agua residual proveniente de la deshidratación de lodos (DHL-01) del digester húmedo RBH-01 y exceso de lixiviados de los tres digestores secos (RBS-01 A/B/C) (cuando los digestores secos se encuentran cargados) al tanque de sedimentación de la planta para separar sólidos en suspensión, antes de ingresarlos a la planta de tratamiento
- ii. Alimentar la planta de tratamiento de agua residual, primero al reactor de filtro anaerobio (RAF-01) y posteriormente a dos etapas en serie de tipo anóxica/aerobia/clarificación, las etapas anóxicas se encuentran agitadas con ayuda de los agitadores “AGH-04 A y B” y las etapas aerobias se

alimentan por medio del soplador “OLM-01” y el aire suministrado se distribuye por un sistema de difusores (DIF-01 A y B). La alimentación de la planta de tratamiento de agua residual se realiza los mismos días de alimentación del digesto anaerobio húmedo (lunes, miércoles y viernes), ya que, para garantizar el volumen activo de lodo dentro del digestor húmedo se debe deshidratar lodo previo a la alimentación del digestor húmedo.

- iii. El agua tratada (agua clarificada) se acumula en el tanque de amortiguamiento TEF-03 y se adiciona manualmente una pastilla de hipoclorito de sodio para eliminar patógenos nocivos al contacto con la piel y así poder reutilizar el agua en la operación de la planta sin complicaciones.
- iv. Para completar el tratamiento, el agua tratada pasa por un filtro de zeolitas (FLZ-01) y finalmente un filtro de carbón activado, esto se logra mediante un equipo hidroneumático (HDP-01). El agua tratada se envía al área de pretratamiento para usarla como agua de dilución de la FORSU o para servicio de limpieza.

Actualmente la planta de tratamiento de agua residual se encuentra en el proceso de estabilización. En la **Tabla 20** se mencionan los equipos que se encuentran instalados en área.

Tabla 20. Equipos instalados en el área de tratamiento de agua residual.

<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>
<b>TAR-01: SED-01</b>	Sedimentador
<b>TAR-01: RAF-01</b>	Reactor anaerobio tipo filtro sumergido
<b>TAR-01: AGH-04 A/B</b>	Agitador del tratamiento de agua residual
<b>TAR-01: DIF-01 A/B</b>	Difusor de aire del tratamiento de agua residual
<b>TAR-01: AIR-01 A/B</b>	Air lift
<b>TAR-01: TEF-03</b>	Tanque de agua tratada
<b>TAR-01: BCM-05</b>	Bomba de alimentación de agua tratada a HDP-01
<b>TAR-01: HDP-01</b>	Hidroneumático del tratamiento de agua residual
<b>TAR-01: OLM-01</b>	Soplador de aire
<b>TAR-01: FLZ-01</b>	Filtro de zeolitas

En la **Figura 30** se muestran los equipos que conforman la planta de tratamiento de agua residual (TAR-01)



Figura 30. Equipos instalados en el área de tratamiento de agua residual.

#### 5.3.4. BIODIGESTIÓN ANAEROBIA HÚMEDA

La planta piloto cuenta con un reactor diseñado para la implementación de la tecnología de digestión anaerobia húmeda con capacidad de 25 m<sup>3</sup> en agitación continua. En el reactor se llevan a cabo las cuatro fases de la descomposición anaerobia de la materia orgánica, los cuales son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, a un régimen de temperatura mesofílico (35°C). Las acciones realizadas en esta área se mencionan a continuación:

- i. Alimentación: La alimentación del reactor anaerobio húmedo se realiza en dos etapas, la primera etapa se procesó residuo orgánico tipo mercados y tianguis, y la segunda etapa se procesó residuo orgánico tipo domiciliario. En ambas etapas la alimentación del reactor anaerobio húmedo con FORSU al 10% de sólidos totales (ST) se realizó cada tercer día (lunes, miércoles y viernes).
- ii. Deshidratación: El reactor húmedo está diseñado para almacenar un volumen máximo de lodos de 21.5 m<sup>3</sup>, lo que permite un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 21 días para la FORSU. Por esta razón y para garantizar el volumen de lodo activo al interior del reactor húmedo cada tercer día

(lunes, miércoles y viernes) se extrae un volumen similar de FORSU al 10% de ST alimentado.

- iii. Tomas de muestra: Los parámetros de temperatura y pH del lodo al interior del reactor son un factor esencial en el desarrollo de microorganismos que intervienen en el proceso de digestión anaerobia. Por esta razón, todos los días se realizó tomas de muestra de lodo del reactor húmedo para corroborar que la temperatura de operación sea de (35°C) y un de pH inferior a 8. En caso de que la temperatura de operación sea menor a 35°C los ciclos de envío de agua de calentamiento se incrementa para mantener una temperatura adecuada al interior del reactor. En caso de que el pH del lodo dentro del reactor sea inferior a 7 se suministra una solución de bicarbonato de sodio para aumentar el pH y se interrumpe la alimentación del reactor hasta que el pH aumente; En el caso de que el pH sea mayor a 8, se alimentará FORSU diluida con mayor frecuencia, esto con la finalidad de que los AGV formados neutralicen el exceso de bicarbonatos presentes en el lodo. En la **Tabla 21** se mencionan los equipos que se encuentran instalados en área.

Tabla 21. Equipos instalados en el área de digestión húmeda.

<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>
<b>RBH-01</b>	Biodigestor húmedo
<b>ISA-01</b>	Serpentín del biodigestor húmedo
<b>AGH-02</b>	Agitador de biodigestor húmedo

En la **Figura 31** se muestran los equipos que conforman el sistema de digestión húmeda (RBH-01).



Figura 31. Equipos instalados en el área de digestión húmeda.

### 5.3.5. BIODIGESTIÓN ANAEROBIA SECA

La planta piloto cuenta con tres reactores diseñados para la implementación de la tecnología de digestión anaerobia seca con capacidad de 3 m<sup>3</sup> en. En cada reactor se llevan a cabo las cuatro fases de la descomposición anaerobia de la materia orgánica, los cuales son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, aun régimen de temperatura mesofílico (35°C). Debido a la carga de trabajo en la operación del sistema de digestión húmeda, así como las pruebas de laboratorio no fue posible operar el sistema de digestión seca. Sin embargo, las acciones que se deben realizar en esta área se basan en el manual de operación de la 3PBg. Las acciones que se deben realizar en esta área se mencionan a continuación:

- i. Alimentación: La alimentación de los reactores secos se realiza de forma manual y cada 14 días para cada módulo y de forma escalonada, lo que permite alcanzar un tiempo de retención de 42 días en cada módulo. La distribución del material orgánico en cada reactor es la siguiente: 1,400 kg de FORSU y 420 kg de digestato (material degradado en el proceso de digestión anaerobia del sistema seco) que sirve como inóculo. El material orgánico alimentado deberá tener una humedad máxima de 80% y 20% de sólidos totales (ST) y un tamaño de partícula de 50 milímetros.

- ii. Inertización de reactores: Para garantizar las condiciones anaerobias en los reactores secos cargados, se inyecta un flujo de nitrógeno gas hasta obtener una atmósfera libre de oxígeno en interior del reactor.
- iii. Calentamiento: Los lixiviados generados en los reactores, se envían al tanque de almacenamiento de lixiviados (TEF-04), en donde serán calentados y posteriormente recirculado a los reactores secos, esto mediante la bomba (BCM-04), esto con la finalidad de mantener las condiciones de temperatura (35°C) adecuadas para el desarrollo de los microorganismos encargados del proceso de digestión.
- iv. Descarga: Transcurrido 42 días de retención de la FORSU en el reactor, el material orgánico se extrae y aproximadamente 420 kg de material orgánico digerido es empleado como inóculo para el siguiente ciclo de digestión.

En la **Tabla 22** se mencionan los equipos que se encuentran instalados en área.

Tabla 22. Equipos instalados en el área de digestión húmeda.

<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>
<b>RBS-01 A/B/C</b>	Biodigestor seco
<b>ISA-02</b>	Serpentín del TEF-04
<b>TEF-04</b>	Tanque de almacenamiento de lixiviados

En la **Figura 32** se muestran los equipos que conforman el sistema de digestión seca (RBS-01 A/B/C).



Figura 32. Equipos instalados en el área de digestión seca.

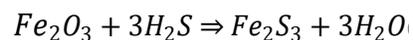
### 5.3.6. ALMACENAMIENTO, TRATAMIENTO DE BIOGÁS Y GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

En esta área se lleva, se almacena y trata el biogás generado en la 3PBg para posteriormente emplearlo como combustible en el motogenerador y así generar energía eléctrica. A continuación, se mencionan las actividades realizadas en esta área durante la operación de la 3PBg:

- i. Muestreo de biogás sin purificar: La composición del biogás es un indicativo de la salud y estabilidad del reactor anaerobio (húmedo o seco), por tal motivo, se realizaron muestreos de biogás dos veces al día (mañana y tarde). La determinación de la composición del biogás se realizó mediante un equipo analizador portátil especializado (Marca: STATUS SCIENTIFIC CONTROLS, modelo: PGD3-IR), el cual tiene la capacidad de detectar Metano ( $\text{CH}_4$ ), Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) y Sulfuro de Hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Además, para tener

un control sobre la cantidad de biogás generado durante la operación de la 3PBg, se realizaron registros diarios del flujo de biogás. Este dato se obtiene del totalizador indicador de flujo (FIT), el cual se encuentra en la línea de salida de biogás del reactor.

- ii. Almacenamiento: El biogás generado en la 3PBg se almacena en un reservorio (GHF-01), el cual tiene una capacidad de almacenamiento de 6 m<sup>3</sup>. Este equipo opera por presión diferencial, es decir cuando la presión del biogás dentro del reservorio es mayor a la presión de entrada, el biogás sale del GHF-01. Aunque el proceso de almacenamiento y descarga del reservorio de biogás se realiza de forma automática, todos los días se verifica la presión del reservorio esto para evitar un alza en la presión que pueda comprometer la integridad del equipo.
- iii. Purificación: El biogás generado en la 3PBg presenta una concentración mayor a 1000 ppm de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), el cual, además de ser tóxico (peligroso para la salud) también es corrosivo (dañar internos de equipos), por esta razón el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) se remueve de la corriente de biogás que alimenta al equipo generador de energía eléctrica (IVA-01). La purificación del biogás se realiza de forma automática y para esto la 3PBg cuenta con dos módulos para purificar el biogás (GLM-01 A/B), estos funcionan mediante reacción de óxido reducción utilizando óxido de hierro (III) (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). En este procedimiento, el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) es adsorbido en óxido de hierro (III). Este proceso corresponde a una desulfuración seca.



El porcentaje de remoción de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) en la 3PBg mediante este sistema es de 99.7%, dejando una concentración de 3 ppm de H<sub>2</sub>S a la salida de los purificadores. De acuerdo con las especificaciones del equipo generador de energía eléctrica (IVA-01), la concentración máxima de H<sub>2</sub>S en la corriente de biogás para la correcta operación del equipo generador

es de 100 ppm, por lo tanto, el biogás obtenido después de los purificadores es adecuado para ser empleado como combustible en el motogenerador.

- iv. Muestreo biogás purificado: El biogás purificado se muestreó todos los días con la ayuda del analizador portátil, esto con la finalidad de determinar su composición (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S), para el caso el H<sub>2</sub>S se monitorea que el valor no sobrepase las 100 ppm, ya que puede dañar los accesorios internos del equipo generador de energía eléctrica. Si el valor de H<sub>2</sub>S sobrepasa las 100 ppm en el biogás, el material de adsorción (óxido de hierro (III)) se renueva.
- v. Generación energía eléctrica: el equipo de generación eléctrica se activa de forma manual y para su funcionamiento se requiere que el biogás presente una composición mínima de metano de 55%, 23% de Dióxido de carbono y menos de 100 ppm de H<sub>2</sub>S y una presión mínima de suministro de biogás de 10 in de agua.

En la **Tabla 23** se mencionan los equipos que se encuentran instalados en área de tratamiento de biogás.

Tabla 23. Equipos instalados en el área de almacenamiento, tratamiento de biogás y generación de energía eléctrica.

<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>
<b>GLM-01</b>	Purificadores de biogás
<b>GHF-01</b>	Reservorio de biogás
<b>OLM-02</b>	Soplador de biogás
<b>TCO-01</b>	Trampa de condensados

En la **Figura 33** se muestran los equipos que conforman el sistema de área de almacenamiento, tratamiento de biogás y generación de energía eléctrica.



Figura 33. Equipos instalados en el área de tratamiento y almacenamiento de biogás.

#### 5.3.7. ÁREA DE CONTROL

En esta área se lleva a cabo la operación y control de los diferentes procesos dentro de la planta 3PBg. Las actividades realizadas en esta área son:

- i. Monitoreo de equipos que sirven como ayuda en la operación y control, así como en la detección de problemas operacionales.
- ii. Accionamiento de equipos de forma automática.
- iii. Energizar y desenergizar los equipos dinámicos y estáticos de la planta

Todos los motores de la 3PBg cuentan con indicadores de estado en el Centro de Control de Motores (CCM) y en el Panel Lógico Programable (PLC) para verificar y determinar si están encendidos y/o apagados. Todos los equipos cuentan con botonera y luces de arranque y paro en la computadora de control, con la excepción del TRI-01, PRT-01, THL-01, AGH-01, AGH-03 y BCM-04, los cuales poseen botoneras de paro y arranque en campo, con el apoyo de luces de estado en el CCM y PLC.

## 5.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA

En esta capítulo se analizará los costos asociados a la operación del sistema de digestión anaerobia húmeda de la 3PBg, esto con la finalidad de determinar los costos de producción de este sistema de digestión. El procedimiento para realizar la evaluación económica del sistema de digestión húmeda se realizó en tres pasos, los cuales se mencionan a continuación:

- I. Definir e identificar los costos asociados a la operación de la planta
- II. Estimación de costos asociados a la operación de la planta
- III. Determinación de costos de operación del sistema de digestión anaerobia húmeda.

### 5.4.1. DEFINICIÓN DE COSTOS

Para este proyecto de investigación, los costos de operación son aquellos necesarios para llevar a cabo la operación del sistema de digestión húmeda de la 3PBg. Dichos costos se mencionan a continuación:

- I. Costo Variable (CV): Son aquellos costos, que como su nombre lo indica aumenta o disminuye en función del volumen de FORSU tratado en la 3PBg.
- II. Costos Fijos (CF): Son aquellos costos que no varían aun cuando varíe el volumen de producción, es decir, se mantiene igual, independientemente de si se trata poco, mucho o no se trata FORSU en la 3PBg.
- III. Costos de Producción (CP): Es la suma de todos los costos que incurren en la operación de la 3PBg. El costo total es la suma de los costos variables y costos fijos.

En la **Tabla 24** se identifican los costos asociados a la operación de la planta piloto.

Tabla 24. Identificación y clasificación de los costos de operación

<b>Costo de producción</b>	<b>Costo Variable</b>	<b>Costo Fijo</b>
<b>Mano de obra</b>		✓
<b>Consumo eléctrico.</b>	✓	
<b>Consumo de reactivos.</b>	✓	
<b>Consumo de Gas LP.</b>	✓	
<b>Consumo de agua.</b>	✓	
<b>Suministro de FORSU</b>		✓
<b>Depreciación de planta</b>		✓

#### 5.4.1.1 Costos Variables.

Para este caso de estudio, los costes variables son los gastos que cambian en función del nivel de actividad y de producción de biogás en la 3PBg. Los costos variables

##### 5.4.1.1.1. Costo por concepto de consumo eléctrico.

Gasto erogado por el consumo energético durante la operación del sistema de digestión húmeda. **Tabla 25** y **Tabla 26** se menciona la capacidad de los equipos y el tiempo de operación de cada uno durante la operación cotidiana de la 3PBg.

Tabla 25. Potencia de equipos instalados en la 3PBg.

<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>	<b>kW</b>
<b>TRI-01</b>	Triturador	11.19
<b>THL-01</b>	Tornillo Helicoidal	2.24
<b>PTR-01</b>	Pretriturador	5.6
<b>BCM-02</b>	Bomba de alimentación a tratamiento de agua	0.37
<b>DLT-01</b>	Deshidratador de lodos	0.22
<b>TAR-01</b>	Paquete de tratamiento de agua residual	2.39
<b>BCM-03</b>	Bomba de alimentación a HDS-01	0.37
<b>BCM-06</b>	Bomba de purga de lodos anaerobios	0.37
<b>EXA-01</b>	Extractor de olores	0.75
<b>OLM-02</b>	Soplador de biogás	0.37
<b>BPM-01</b>	Bomba de alimentación a biodigestor húmedo	0.37
<b>AGH-02</b>	Agitador de biodigestor húmedo	0.75
<b>IVA-01</b>	Generador eléctrico	-8
<b>IVA-02</b>	Generador eléctrico	-8
<b>BCM-04</b>	Bomba de recirculación de lixiviados	0.37
<b>IQA-01</b>	Quemador de biogás	0.37
<b>TAC-02</b>	Iluminación planta	0.66
<b>TAC-04</b>	Contactos planta	0.54
<b>TAC-05</b>	Iluminación CTO operador	0.26
<b>TAC-06</b>	Contactos CTO operador	0.54
<b>AGH-01</b>	Agitador de disolución bicarbonato de sodio	0.25
<b>AGH-03</b>	Agitador de disolución de polímero	0.25
<b>BCM-01</b>	Bomba de alimentación a calentador de agua	0.37
<b>BDM-01</b>	Bomba dosificadora de bicarbonato de sodio	0.06
<b>BDM-02</b>	Bomba dosificadora de polímero	0.06
<b>CTR</b>	Sistema de control (PLC)	1.1
<b>TL-01</b>	Mufla laboratorio	1.1
<b>TL-02</b>	Contactos laboratorio	0.54
<b>TL-03</b>	Iluminación laboratorio	0.27
<b>TL-04</b>	Horno laboratorio	0.25
<b>TL-05</b>	Frigorífico laboratorio	0.15

En **Tabla 26** se muestra el consumo de energía eléctrica en un día de operación de la 3PBg.

Tabla 26. Tiempo de operación de equipos y consumo eléctrico durante un día de operación de la 3PBg.

Equipo	Horas del día																								h/d	kW-h		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
TRI-01															1										1	11.19		
THL-01															1											1	2.24	
PTR-01															1											1	5.6	
BCM-02	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	24	8.95	
DLT-01									1	1	1	1	1	1	1	1	1	1									10	2.23
TAR-01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	24	57.29	
BCM-03											1	1															2	0.75
BCM-06													1														1	0.37
EXA-01															1												1	0.75
OLM-02																											0	0
BPM-01											1	1	1														3	1.12
AGH-02	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	24	17.9	
IVA-01																											0	0
IVA-02																											0	0
BCM-04													1														1	0.37
IQA-01																											0	0
TAC-02	1	1	1	1	1	1	1	1	1									1	1	1	1	1	1	1	1	15	9.86	
TAC-04	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	24	12.96	
TAC-05	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	24	6.19	
TAC-06	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	24	12.96	
AGH-01															1					1							2	0.5
AGH-03															1					1							2	0.5
BCM-01			1			1			1			1			1			1				1				4	1.49	
BDM-01																											0	0
BDM-02																											0	0
CTR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	24	26.4	
TL-01											1	1	1	1	1	1											6	6.6
TL-02									1	1	1	1	1	1	1	1											8	4.32
TL-03									1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1								10	2.72
TL-04									1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1								10	2.5
TL-05	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	24	3.67	
Consumos totales (kw-h):	6.75	6.75	6.94	6.75	6.75	6.94	6.75	6.75	7.57	8.48	9.23	9.41	10.1	8.48	28.4	7.38	6.84	7.69	7.25	6.75	6.94	6.75	6.75	6.94	6.94	270	199.42	

Con los valores de consumo eléctrico de la 3PBg reportados en la **Tabla 26** y tomando en cuenta la Tarifa 2 de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), dicha tarifa está destinada a todos los servicios de energía en baja tensión para cualquier uso, con una demanda eléctrica de hasta 25 kW se determinara el monto por el concepto de consumo de energía eléctrica.

#### 5.4.1.1.2 Costo por concepto de consumo de reactivos

Costos por el pago de reactivos necesarios en el proceso de Digestión anaerobia húmeda, los reactivos empleados en la operación de la 3PBg son los siguientes:

- El Polímero empleado en el proceso deshidratación de lodos es el FLOPAM EM640CT es un floculante catiónico utilizado en el tratamiento de agua potable, efluentes industriales con excelentes resultados en industria textil, papelera, minera, alimenticia, etc. Su aplicación complementa la acción de un coagulante y ofrece excelentes resultados de remoción de sólidos suspendidos totales, turbidez y color, así como material coloidal en suspensión.
- El bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) grado técnico con 97% de pureza, el cual se emplea para aumentar el pH de la FORSU antes de ser alimentado al reactor anaerobio húmedo, y de igual forma se emplea para controlar el pH bajo de los lodos de reactor ( $< 7$ ).

En la **Tabla 27** se menciona la cantidad de reactivos estimados a emplear en un año de operación de la 3PBg. Para el caso del bicarbonato de sodio se considera un consumo promedio de 13 g por kg de FORSU y un promedio de suministro de FORSU de 408 kg y 316 kg de residuos de mercados y tianguis y residuos de tipo domiciliario, respectivamente. El valor promedio de peso de la FORSU se obtuvo de sumar la cantidad de FORSU suministrada (solo material orgánico aprovechable) y dividida entre el número de eventos en que se suministró el residuo.

Tabla 27. Cantidad y costo de reactivos empleado en la operación de la 3PBg

Denominación	Pureza kg activo /kg prod comercial	Cantidad producto comercial kg/año
Emulsión Catiónica	47%	172.46
Bicarbonato de Sodio	97%	1,208.62

#### 5.4.1.1.3 Costo por concepto de consumo de Gas LP

Costo por el consumo de gas LP empleado como fuente de energía en el sistema de calentamiento de la 3PBg y con lo cual, se garantiza la temperatura de 35°C (temperatura de operación “mesofilica). En la **Tabla 28** se menciona la cantidad de energía requerida por el sistema de digestión húmeda para mantener la temperatura de 35° en el reactor con un gradiente de temperatura de  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ .

Tabla 28. Cantidad de energía requerida por el sistema de digestión húmeda para mantener las condiciones mesofilicas en el reactor húmedo.

Operación	Valor	Unidades
Volumen de reactor	25	m <sup>3</sup>
Volumen activo del reactor	80	%
Volumen de lodo a calentar	20	m <sup>3</sup>
Densidad de los lodos	1,002.34	kg/m <sup>3</sup>
Masa de lodos a calentar	20,046.8	Kg
Capacidad calorífica del agua	1,000	cal/kg <sup>0</sup> C
Delta de temperatura [ $\Delta T$ ]	0.5	°C
Calor requerido para calentar el lodo	10,023,400	cal
Calor requerido para calentar el lodo	39,748.6	BTU

#### 5.4.1.1.4 Costo por concepto de consumo de agua

Gasto asociado al consumo de agua potable requerida para la operación continua de la 3PBg; el agua potable se utiliza en el área de pretratamiento de la FORSU como agua de dilución, así mismo se emplea en servicios generales como son: limpieza de áreas, limpieza del laboratorio móvil, para lavabos y baños, etc...

Para determinar el costo asociado al consumo de agua potable en la 3PBg se tomó en cuenta el consumo bimestral de agua potable de la planta, el cual es de 182 m<sup>3</sup>, y las tarifas aplicables por consumo de agua en el municipio de Cuautitlán Izcalli, lugar donde se encuentra ubicada la planta. En la **Tabla 29** se muestra las tarifas por consumo bimestral aplicable en el Municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México.

Tabla 29. Tarifas de consumo de agua bimestral

<b>Consumo bimestral por m<sup>3</sup></b>	<b>Cuota mínima para el rango inferior</b>	<b>Por m<sup>3</sup> adicional al rango inferior</b>
<b>0-15</b>	4.2660	0.0000
<b>15.01-30</b>	4.2660	0.2800
<b>30.01-45</b>	8.4500	0.2850
<b>45.01-60</b>	12.7130	0.3140
<b>60.01-75</b>	17.4160	0.4760
<b>75.01-100</b>	24.5560	0.6460
<b>100.01-125</b>	40.6930	0.8240
<b>125.01-150</b>	61.2900	0.8510
<b>150.01-300</b>	82.5690	0.9000
<b>300.01-500</b>	217.4560	0.9480
<b>500.01-700</b>	407.1180	0.9570
<b>700.01-1200</b>	598.2780	0.9860
<b>1200.01-1800</b>	1091.3100	1.0330
<b>1800.01 En adelante</b>	1710.6680	1.0510

Nota: Datos obtenidos de la Gaceta del Gobierno del Estado de México, 2018.

Como se observa en la **Tabla 29** anterior, el valor de 150.01-300 m<sup>3</sup> bimestrales se toma en cuenta para cálculo del costo por el concepto de pago de agua potable, esto debido a la demanda bimestral que presenta la planta (182.5 m<sup>3</sup>).

#### 5.4.1.2 Costos Fijos

Para este caso de estudio, los costes fijos son aquellos que en el corto plazo o para ciertos niveles de tratamiento de FORSU y de producción de biogás en la 3PBg no varían.

##### 5.4.1.2.1 Costos por el concepto de mano de obra

Este criterio considera el pago del personal de apoyo necesario en la operación de la 3PBg. En la **Tabla 30** se describe las actividades realizadas por el personal de apoyo.

Tabla 30. Actividades realizadas por el personal de apoyo.

Personal de apoyo	Actividades
<b>Persona 1</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Apoyo en pesaje de FORSU suministrada.</li><li>• Apoyo en caracterización física de la FORSU (método de cuarteo).</li><li>• Apoyo en el pretratamiento de la FORSU (selección de materiales orgánicos susceptibles a digestión anaerobia, y trituración del material orgánico).</li></ul>
<b>Persona 2</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Apoyo en alimentación del sistema de digestión húmeda</li></ul>
<b>Persona 3</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Apoyo en tomas de muestra de lodo del digestor húmedo (pH y temperatura).</li><li>• Apoyo en la deshidratación de lodos del reactor húmedo (RBH-01).</li><li>• Apoyo en la alimentación de los reactores secos y un reactor húmedo.</li><li>• Apoyo en las tomas de muestra de biogás.</li><li>• Apoyo en limpieza de la 3PBg</li></ul>

Con base en las actividades por desarrollar por parte del personal de apoyo, se estableció la retribución que tendría dicho personal. En la **Tabla 31** se muestra los conceptos considerados para el pago del personal necesarios para la operación de la 3PBg.

Tabla 31. Conceptos considerados para el pago del personal

<b>Conceptos</b>	<b>Monto mensual</b>	
<b>Honorario</b>	\$	7,597.00
<b>Seguro (IMSS)</b>	\$	500.00
<b>Total</b>	\$	8,097.00

Debido a que el personal de apoyo se contrató a través de su incorporación al proyecto “BioGas-CEAR/07/2016. “CEMIE-Clúster Biocombustibles Gaseosos” en la Acción Estratégica 2 (AE2): producción de metano por digestión y co-digestión, FORSU y lodos de purga” y los montos erogados para el pago de este personal se obtuvo de los fondos del fideicomiso del proyecto. Por tal motivo, el pago del personal se incluyó los impuestos marcados por el servicio de administración tributaria (SAT), la Tasa de Impuestos considerados para determinar el costo por el concepto de pago de personal son las siguientes:

- Impuesto al Valor Agregado (IVA) con un valor de 16.00%
- Impuesto al Valor Agregado (IVA) retenido con un valor de 10.67%
- Impuesto Sobre la Renta (ISR) retenido con un valor de 10.00%

Con el valor del monto a pagar mensualmente (sin impuestos) y el valor de impuestos a aplicar se determinará el monto mensual con impuestos a pagar al personal de apoyo.

#### 5.4.1.2.2. Costo por el suministro de FORSU

Es el costo asociado a la recolección, separación y traslado de material orgánico a la 3PBg, así como, el traslado a sitio de disposición final de material orgánico e inorgánico de rechazo y lodos deshidratados para la operación del reactor anaerobio húmedo, se obtuvo a través de una licitación pública para la ejecución del servicio “RECOLECCIÓN, SEPARACIÓN, TRANSPORTE Y DISPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN SU FRACCIÓN ORGÁNICA”. Las empresas

participantes presentaron su oferta Técnica y Económica para la ejecución del servicios, esto en función de los “Términos de Referencia” del servicio solicitado, este documento describe el servicio requerido, así como, los alcances y obligaciones del prestador del servicio. Las empresas concursantes para la ejecución del servicio antes mencionado tuvieron que demostrar que contaban con registros específicos para ser considerados en esta licitación, los registros solicitados a las empresas participantes se mencionan a continuación:

- Registro y autorización de establecimientos Mercantiles, de servicios y/o unidades de transporte relacionados con el manejo integral de residuos sólidos urbanos y/o de manejo especial de competencia local que operen y transiten en la Ciudad de México y Estado de México”.
- Registro ante la Secretaria de Hacienda y Crédito Público (SHCP) y presentar la constancia de situación fiscal del SAT.
- Registro como proveedor de servicios ante la Facultad de Química de la UNAM. Esto debido a que la planta piloto en este periodo se encuentra a cargo de la Facultad de Química de la UNAM.

La empresa ganadora de la licitación establecerá los montos económicos para llevar acabo el servicio de “RECOLECCIÓN, SEPARACIÓN, TRANSPORTE Y DISPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN SU FRACCIÓN ORGÁNICA”

#### 5.4.1.2.3. Costos por el uso de planta piloto (depreciación)

Este costo se define como la disminución del valor o precio de un bien con relación al que antes tenía, por la obsolescencia progresiva que el bien tangible tiene.

La depreciación de la 3PBg se calculó a través del “Método de depreciación de la suma de dígitos anuales” (SDA): Bajo este método, el cargo anual por depreciación se obtiene multiplicando el valor neto por depreciar (P-VS) por una fracción que resulta de dividir el número de años de vida útil restante entre la suma de dígitos de los años 1 a “n” de la vida útil del activo, en la ecuación 1 y ecuación 2 se muestran las ecuaciones empleadas para establecer la depreciación mediante este método.

$$D = \left[ \frac{n-(t-1)}{n*(n+1)/2} \right] * (P - VS) \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$SDA = \frac{N*(N+1)}{2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

D: Depreciación anual.

SDA: Suma de dígitos anuales.

P: Valor del activo.

VS: Valor residual del activo después de su vida útil

n: Vida útil o vida sujeta a depreciación del activo.

t: Periodo durante el cual se desea conocer el valor en libras, desde al año 1 a “n” años.

Los datos para determinar la depreciación de la 3PBg se observan en la **Tabla 32**.

Tabla 32. Información para determinar la depreciación de planta piloto.

<b>Parámetro</b>	<b>Planta piloto</b>
<b>Valor del activo (P)</b>	\$ 2,995,773.53
<b>Valor residual del activo (VS), se estima un 30% de valor de la inversión</b>	\$ 898,732.05
<b>Depreciación total al cabo de la vida útil</b>	\$2,097,041.47
<b>Vida útil (años)</b>	10
<b>SDA con base en la ecuación 2</b>	$SDA=10*(10+1)2=1102=55$

#### 5.4.2. DETERMINACIÓN COSTO DE OPERACIÓN DE LA 3PBg.

El costo de la operación de la planta piloto es resultado de concentrar los montos erogados de cada criterio evaluado. Por lo tanto, el costo de operación del sistema de digestión anaerobia húmeda se determinó empleando la siguiente formula.

$$C_{OP} = C_{VA} + C_F$$

Donde:

$C_{OP}$ : Costos de operación de la planta piloto.

$C_{VA}$ : Suma de costos variables de la 3PBg.

$C_F$ : Suma de costos fijos de la 3PBg.

## 6.RESULTADOS

### 6.1. CARACTERIZACIÓN DE LA FORSU

El estudio de caracterización de los residuos orgánicos procesados en la 3PBg consistió en dos tipos de determinaciones, una de tipo físico (caracterización física) en la cual se pesa cada uno de los componentes identificables visualmente en la muestra, y otro de tipo fisicoquímico para los cuales las muestras son procesadas en el laboratorio para determinar el porcentaje de los diferentes componentes estructurales que la integran.

En la caracterización física de las muestras de residuos orgánicos se determina el porcentaje de los diferentes subproductos que las componen y la determinación del peso volumétrico, de acuerdo a lo establecido en las NMX-AA-019-1985 y NMX-AA-022-1985. Estas determinaciones se realizaron en las instalaciones de la 3PBg.

#### 6.1.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA.

En la **Tabla 33** se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de los residuos orgánicos suministrados, tanto para el sistema de digestión anaerobia húmeda como seca.

Tabla 33. Caracterización de la FORSU

<b>Sub productos</b>	<b>Digestión húmeda</b>	
	Mercados y tianguis	Domiciliario
<b>Vegetales</b>	33.90%	43.00%
<b>Frutas</b>	53.60%	21.00%
<b>Otros orgánicos</b>	1.00%	21.00%
<b>Cárnicos</b>	0.50%	4.00%
<b>Jardinería</b>	6.00%	5.00%
<b>Plástico</b>	2.50%	3.00%
<b>Cartón</b>	0.90%	1.00%
<b>Lixiviados</b>	1.70%	1.00%
<b>Madera</b>	0.01%	0.03%
<b>Sanitarios</b>	0.01%	0.03%
<b>Metal</b>	0.003%	0.13%
<b>Tela</b>	0.003%	0.04%
<b>Vidrio</b>	0.00%	0.12%

Nota 1: La designación “Otros orgánicos” se refiere a los subproductos cuya naturaleza no se puede diferenciar visualmente, tratándose entonces de una especie de pasta heterogénea, compuesta de residuos de pan, tortillas, pastas, y en general de alimentos cocinados.

Nota 2: En el ANEXO 9.1 se presenta la metodología empleada para realizar la caracterización de los residuos orgánicos.

En esta caracterización física de los residuos se establecieron 13 subproductos, de los cuales, 6 son tratables mediante digestión anaerobia (vegetales, frutas, cárnicos, jardinería, lixiviados y otros orgánicos), 6 subproductos inorgánicos valorizables y 1 subproducto no valorizable (residuos sanitarios).

La FORSU suministrada se analizó en el laboratorio de la planta piloto, esto con el fin de determinar el porcentaje de humedad y de sólidos totales, estos parámetros son importantes para calcular la cantidad de agua que se debía adicionar en el pretratamiento de la FORSU previo a la digestión anaerobia húmeda, para conseguir una mezcla de alimentación de 10 % de sólidos totales.

En la **Tabla 34** se presentan los valores promedio de humedad, de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y sólidos fijos (SF) presentes en los diferentes tipos de residuos orgánicos.

Tabla 34. Promedios de porcentajes de sólidos presentes en los diferentes tipos de residuos orgánicos.

Parámetros	Digestión húmeda	
	Mercados y tianguis	Domiciliario
<b>%Humedad</b>	87.22	74.44
<b>% ST</b>	12.78	25.56
<b>% SV</b>	11.6	22.23
<b>% SF</b>	1.18	3.33

NOTA: En los ANEXO 9.2 y ANEXO 9.3 se han incluido las metodologías empleadas para determinar el porcentaje de humedad y de sólidos totales de la FORSU, así como la metodología empleada para determinar la cantidad de agua de dilución para la FORSU con porcentajes de sólidos totales mayores al 10%.

Como se observa en la **Tabla 34**, el tipo de residuo orgánico domiciliario es el que presenta la mayor cantidad de sólidos totales, seguido por los residuos orgánicos de mercados y tianguis, con 25.56% y 12.78 % respectivamente. Esto quiere decir que los residuos orgánicos de mercados y tianguis son los que requieren la menor cantidad de agua para lograr la concentración de 10% de sólidos totales, requeridos para la alimentación al reactor de digestión anaerobia húmeda.

Los residuos orgánicos de mercados y tianguis, principalmente verduras y frutas crudas, contienen una elevada humedad de forma natural. En el caso de los residuos orgánicos domiciliarios, se encuentra una cantidad importante de alimentos procesados a nivel industrial y otros cocinados de forma domiciliaria lo cual repercute en un menor contenido de humedad. En la **Figura 34** y en la **Figura 35** se muestra la diferencia entre los residuos orgánicos de los mercados y tianguis con respecto a los domiciliarios.



Figura 34. Residuos orgánicos de mercados y tianguis



Figura 35. Residuos orgánicos domiciliarios

### 6.1.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA FORSU Y DEL DIGESTATO

En la mayoría de los trabajos enfocados a utilizar la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) como sustrato para procesos de digestión anaerobia, los parámetros que se determinan de forma común son: sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), relación SV/ST, nitrógeno amoniacal (NA) y fósforo total (PT). Estas características son utilizadas para determinar de forma preliminar el contenido de materia biodegradable y la relación de nutrientes contenidos en la FORSU. Parámetros como los anteriormente mencionados permiten estimar valores teóricos de producción de biogás (Buffiere et al., 2006).falta ref.

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos practicados a todas las muestras de residuos orgánicos procesados en la 3PBg, además se presentan los resultados de los análisis practicados a las muestras de digestato extraído del reactor húmedo.

#### 6.1.2.1. DQO

En la **Tabla 35** se presentan los valores obtenidos para la prueba de demanda química de oxígeno (DQO), pocos trabajos realizan esta determinación debido a lo

heterogénea que es la FORSU y lo complicado que resulta en muchas ocasiones reproducir los resultados. Sin embargo, la determinación de la DQO representa un criterio más para evaluar el contenido de materia orgánica en las muestras de residuos orgánicos, y permite establecer el flujo másico a través de la carga orgánica, esto como un medio para elaborar un balance de masa con base en la remoción de materia orgánica. La técnica para determinación de la DQO, consiste en una digestión ácida de la muestra a analizar a una temperatura de 150 °C, en reflujo cerrado durante dos horas, para su posterior análisis por fotometría a 600 nm

Tabla 35. DQO de FORSU y digestato

Muestra		DQO (gO <sub>2</sub> /kg FORSU fresca)	Desviación estándar
Mercados y tianguis	Digestato	149	2
	FORSU	294	7
Domiciliarios	Digestato	105	21.2
	FORSU	228	71

Nota: En el ANEXO 9.4 se muestra la metodología empleada para determinar la demanda química de oxígeno en las muestras.

Los valores de DQO para las muestras de residuos orgánicos del municipio de Naucalpan de Juárez se encuentran en el intervalo de 228 a 294 gO<sub>2</sub>/kg. Estos valores son comparables en orden de magnitud con respecto a otros reportados a nivel internacional, como ejemplos se tiene que, en Padua, Italia, se han reportado valores de 575 gO<sub>2</sub>/kg (Alibardi y Cossu, 2015), 350 gO<sub>2</sub>/kg en Karlsruhe, Alemania (Nayono et al., 2009) , y 140 gO<sub>2</sub>/kg en Cádiz, España (Forster-Carneiro et al., 2008b). La composición de los residuos orgánicos es muy variable en todas partes del mundo.

En los reactores de digestión anaerobia, la diferencia de valores de DQO entre el sustrato (FORSU) y el digestato, proporciona una medida del desempeño de los reactores en cuanto a la transformación de materia orgánica en biogás. De acuerdo con valores reportados en literatura, el porcentaje de remoción promedio de DQO en procesos de digestión anaerobia es de 80%, cabe mencionar que este porcentaje de remoción se logra en periodos prolongados de operación, y composición de

sustratos constantes. En este estudio, la remoción de materia orgánica en los reactores fue similar para todas las muestras obteniéndose una remoción promedio del 51% para mercados y tianguis y 45.9% para domiciliarios

#### 6.1.2.2. Nitrógeno amoniacal y fósforo total

Estas pruebas brindan información importante con respecto a los nutrientes que pueden ser utilizados a partir de la FORSU suministrada al digestor, considerándose ampliamente aprovechables en el digestato producido, para generación de fertilizantes y mejoradores de suelo. En la **Tabla 36** se muestran los valores de nitrógeno amoniacal y fósforo total.

La técnica para determinación de nitrógeno amoniacal incluye un análisis por colorimetría y consiste en incrementar el pH de la muestra con NaOH (6 N) hasta 9.5, destilar la muestra y titular con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0.02 N), registrando el volumen gastado. La determinación de fósforo total se lleva a cabo por fotometría y consiste en una digestión de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y HNO<sub>3</sub>, para luego utilizar el método colorimétrico del ácido vanadomolibdofosfórico para leer absorbancia a 470nm.

Tabla 36. Nitrógeno amoniacal y fósforo total en FORSU y digestato

Muestra		N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g/kg)	Desviación estándar	Pt (g/kg )	Desviación estándar
<b>Mercados y tianguis</b>	Digestato	1.4	0	2.8	0.1
	FORSU	0.7	0.3	25.2	0.7
<b>Domiciliarios</b>	Digestato	2.1	0.1	5.1	0.2
	FORSU	0.8	0.1	28	1.9

En los ANEXO 9.5 y ANEXO 9.6 se presenta la metodología empleada para determinar el nitrógeno amoniacal y fósforo total en FORSU y digestato, en las muestras.

A partir de los resultados de la **Tabla 36** se puede observar que existe acumulación de nitrógeno amoniacal durante el proceso de digestión, del orden de 50% para mercados y tianguis y 60% para domiciliarios, esto se relaciona directamente con el contenido de productos cárnicos en las muestras; es decir a mayores cantidades de proteínas presentes se encontrarán en las muestras mayores cantidades de nitrógeno.

El contenido de nitrógeno en el proceso se ve directamente relacionado con el tipo de sustrato que es alimentado al digestor, es importante considerar FORSU con un contenido adecuado de cárnicos, lácteos y alimentos que proporcionen compuestos nitrogenados ya que la calidad del digestato presentará valores más altos que pueden ser aprovechados en otros procesos económicamente viables como los mencionados (fertilización y mejoramiento de suelos).

#### 6.1.2.3. Alcalinidad y los AGV

La alcalinidad y los ácidos grasos volátiles (AGV) son parámetros de gran importancia para evaluar indirectamente el equilibrio de la presencia de los diferentes tipos de comunidades microbianas presentes en los reactores anaerobios y para evaluar la eficiencia dichos reactores en cuanto a la producción de biogás. En la **Tabla 37** se observan las concentraciones de alcalinidad, en términos de gramos de carbonato de calcio, y de gramos de ácido acético como indicador de AGV, esto por kilogramo de FORSU.

La técnica para determinación de la alcalinidad consiste en una titulación con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (0.1 N) de la muestra hasta alcanzar los valores de 5.75 para la alcalinidad parcial y de 4.3 para la alcalinidad intermedia. El valor del índice alfa es el resultado de la relación de las alcalinidades antes mencionadas (Pérez y Torres, 2008).

La técnica para la determinación de ácidos grasos volátiles consiste en una titulación en retroceso a un pH de 4 y de 7 con NaOH (0.1 N) a partir de la muestra acidificada a un pH de 3, centrifugada y puesta en ebullición (DiLallo y Albertson, 1961).

Tabla 37. Alcalinidad, AGV e índice alfa en FORSU y digestato

Muestra		Alcalinidad (gCaCO <sub>3</sub> /kg)	SD	AGV (gCH <sub>3</sub> COOH/ kg)	SD	Índice alfa	SD
<b>Mercados y tianguis</b>	Digestato	7.8	0.3	0.5	0.1	0.9	0
	FORSU	4.5	0.2	7.6	0.7	0.2	0
<b>Domiciliario</b>	Digestato	8.1	0.1	3.8	0.7	0.7	0.1
	FORSU	3.7	0.4	5.5	1.2	0.4	0.1

En el ANEXO 9.7 se presenta la metodología empleada para determinar el grado de alcalinidad (índice alfa).

SD: Desviación estándar

La literatura reporta valores de pH para la FORSU en un intervalo de entre 4.1 y 6.2 (VALORGAS, 2010). El valor de pH determinado para la FORSU de mercados y tianguis es de 4, mientras que para residuos orgánicos domiciliarios presenta valores de 4.6. El valor de pH del digestato obtenido del procesamiento anaerobio de los dos tipos de sustratos fue de 8.5.

De acuerdo a Speece (1996), la medición de la relación entre la alcalinidad debida a los AGV y la alcalinidad total es usualmente empleada para el control de la estabilidad del proceso anaerobio. Al ser consumidos los AGV durante el proceso, la alcalinidad en el medio aumenta. El digestato (producto de la digestión anaerobia) incrementa su pH con relación a la FORSU hasta 8.5, un 50 % más aproximadamente debido al proceso de digestión generado dentro del digestor. La alcalinidad a la salida del digestor se incrementó para cada sustrato un 42% para mercados y tianguis y 55% para domiciliarios. La variación en el incremento de la alcalinidad del digestato (producto de la digestión anaerobia) depende de cómo los AGV de los sustratos se consumen en el sistema, estabilizando el digestato y haciéndolo adecuado para otros procesos antes mencionados. Los valores reflejan un comportamiento adecuado y típico en procesos de digestión anaerobia de FORSU, demostrando una correcta operación del digestor para el propósito de generación de biogás.

El valor del índice alfa es un valor recurrentemente utilizado en la literatura y en la práctica para una rápida interpretación del comportamiento alcalino en el medio de estudio, su valor se encuentra comprendido entre cero y uno; la literatura recomienda tener en los reactores anaerobios valores cercanos a uno, pues esto es

indicativo de una mejor capacidad amortiguadora en el sistema. En las muestras de digestato se obtuvieron valores de 0.9 y 0.7, para las muestras del resultado del procesamiento anaerobio de residuos orgánicos de mercados y tianguis y domiciliarios. Esto indica que en los reactores anaerobios se tuvo una adecuada adaptación de la biomasa a los diferentes sustratos y que, por lo tanto, los reactores anaerobios operaron correctamente.

## 6.2. PRUEBAS DE POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO

La técnica de potencial bioquímico de metano se realiza para determinar la biodegradabilidad anaerobia de los residuos y, con ello, evaluar su potencial de tratamiento para la producción de máxima biogás. Los resultados generados por esta prueba son la base para definir la tratabilidad de un sustrato determinado por medios anaerobios.

Con la finalidad de evaluar el sustrato que llega a la planta y simular en condiciones controladas el proceso de digestión anaerobia al que se somete la FORSU. Las pruebas se montaron en el equipo Automatic Methane Potential Test System (AMPTS por sus siglas en inglés) utilizando una relación en masa de SV 2:1 de sustrato: inóculo, en digestores de vidrio de 500 mL sellados herméticamente e inertizados con gas nitrógeno para garantizar condiciones anaerobias. Se adicionó una solución de micronutrientes y un medio basal para garantizar el control de la alcalinidad. En la **Figura 36** se muestran los resultados obtenidos en los experimentos llevados a cabo con muestras de residuos orgánicos de mercados y tianguis.

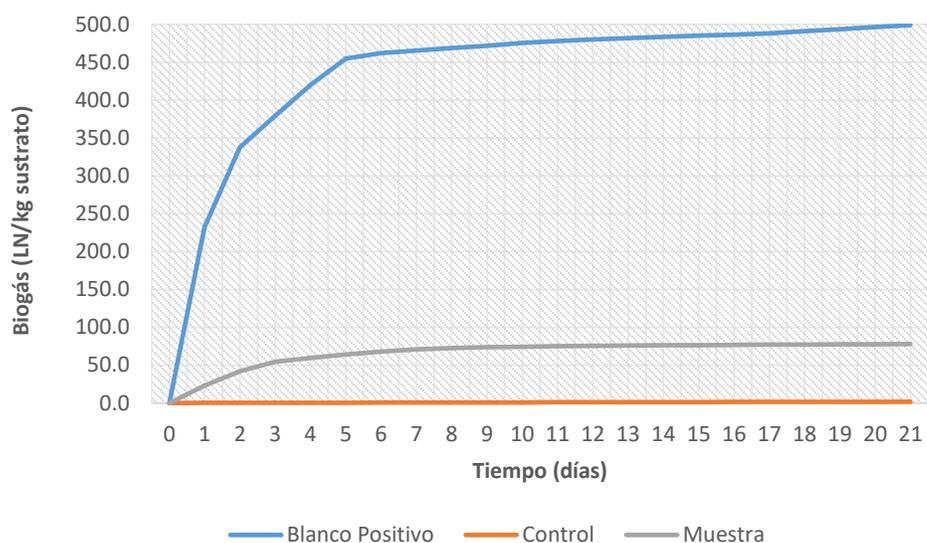


Figura 36. Producción específica de biogás para muestra de tianguis y mercados

En la **Figura 36** se presentan tres curvas de producción de biogás. La curva que corresponde al blanco positivo se obtuvo con una mezcla conformada con digestato proveniente de la 3PBg como inóculo y dextrosa como sustrato completamente biodegradable, esta produjo 499.2 LN/kg dextrosa. La curva que corresponde al control se conformó con digestato como inóculo y a su vez como sustrato, tuvo una producción de 1.8 LN/kg digestato, en donde se observa que la producción de biogás del digestato fue 99.6% inferior en comparación con la dextrosa como sustrato y, por último, la curva correspondiente a la muestra de mercados y tianguis tuvo una producción de 78 LN/kg FORSU, alcanzando un 16% de producción de biogás respecto a los obtenidos con dextrosa.

En la **Figura 37** se muestran los resultados obtenidos para la muestra de residuos orgánicos domiciliarios.

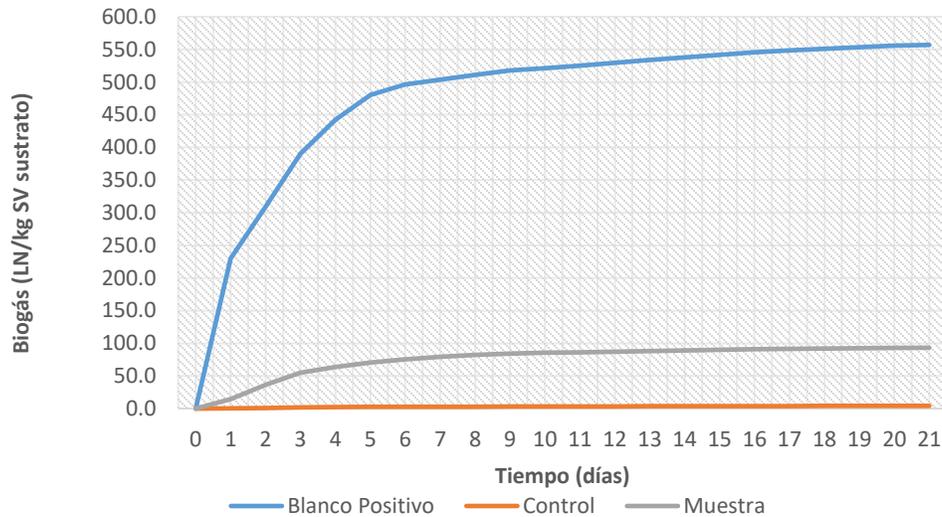


Figura 37. Producción específica de biogás para muestra de residuos orgánicos domiciliarios

Los ensayos de producción de biogás a partir de residuos orgánicos domiciliarios se conformaron de la misma forma que en los que se utilizaron residuos orgánicos de mercados y tianguis. Con el blanco positivo se tuvo una producción específica de 557 LN/kg dextrosa; para el control se obtuvo 4.2 LN/kg digestato, lo que corresponde a una producción de 0.8% respecto a la dextrosa y 93.2 LN/kg FORSU para la muestra de residuos orgánicos domiciliarios, lo que corresponde a una producción de un 17% de producción respecto a la dextrosa.

En la **Figura 38** se muestra el resumen de los resultados de la prueba de potencial bioquímico de metano realizada con las muestras de mercados y tianguis y residuos de tipo domiciliarios.

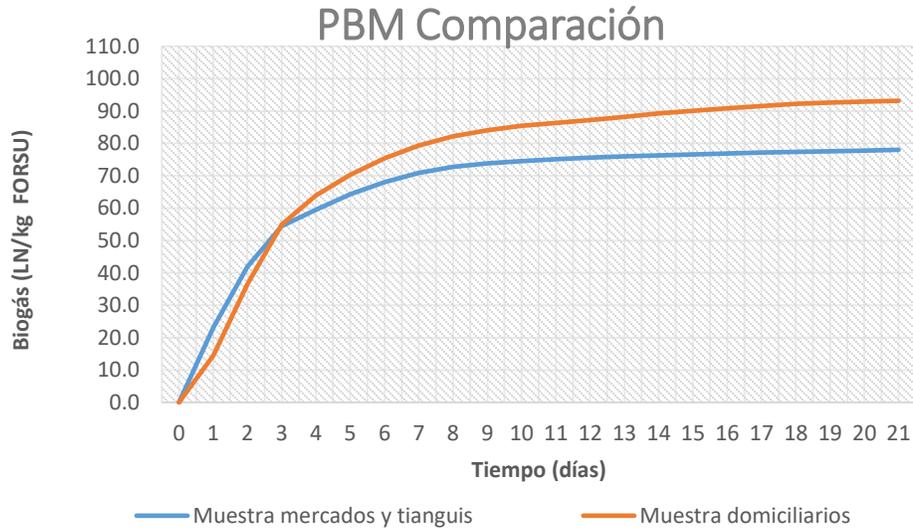


Figura 38. Producción específica de Biogás para los diferentes tipos de muestras utilizados

En la **Figura 38** se observan las curvas obtenidas a partir de la prueba de potencial bioquímico de metano para cada una de las muestras analizadas, siendo la correspondiente a la muestra de domiciliarios la que obtuvo el valor más grande con una producción específica de 93.2 LN/kg FORSU, el cual es 16 % mayor respecto a la muestra de mercados y tianguis cuyo valor registrado fue 78 LN/kg FORSU.

Procesos como BTA en Alemania reportan producciones de entre 80-120 LN/kg de sustrato y Linde KCA en Alemania producciones de entre 90-130 LN/kg de sustrato.

Se puede concluir entonces que el proceso opera de forma típica, produciéndose valores cercanos a los encontrados en literatura.

## 6.3. OPERACIÓN DE LA PLANTA PILOTO

En el presente trabajo se analizaron dos tipos de residuos sólidos orgánicos urbanos recolectados en el municipio de Naucalpan de Juárez, en el Estado de México. Los dos tipos de residuos, en función de su origen, se denominaron de la siguiente forma: a) Mercados y tianguis, y b) domiciliarios. En los apartados siguientes se presentarán los resultados obtenidos en la operación de la 3PBg, particularmente la operación del sistema de digestión húmeda.

### 6.3.1. CANTIDADES PROCESADAS DE FORSU

El suministro de residuo por parte del municipio de Naucalpan de Juárez hacia la 3PBg se realizó tres veces por semana (lunes, miércoles y viernes). Esta frecuencia de suministro de residuos orgánicos a la 3PBg se determinó como resultado de varias reuniones de planeación con personal de la Dirección General de Medio Ambiente “DGMA” y la Dirección General de Servicios Públicos “DGSP” del municipio de Naucalpan; la Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional “GIZ” y de la FQ de la UNAM, en las cuales se tuvieron en cuenta factores como: dificultades en la separación de los residuos orgánicos, asuntos a resolver en la gestión de los residuos (obtención, manejo y traslado) y los recursos humanos, materiales y económicos asignados para este proceso.

Los residuos de mercados y tianguis provenían de tres sitios pertenecientes al municipio de Naucalpan: San Mateo, El Molinito y Naucalpan Centro. Estos residuos fueron recolectados, separados y transportados en botes de 200 litros, esta actividad estuvo a cargo de personal del Departamento de Servicios Públicos de Naucalpan. En la **Figura 39** y **Figura 40** se ilustra el suministro de residuos a la planta piloto.



Figura 39. Personal Departamento de Servicios de Naucalpan



Figura 40. Traslado de residuos de mercados y tianguis.

Los residuos orgánicos domiciliarios fueron recolectados, separados y transportados en dos contenedores de 1100 litros, estos residuos se recolectaron en el Centro de Transferencia de residuos sólidos (CETRA), ubicado en el paraje El Zopilote, en San Francisco Chimalpa. Esta actividad estuvo coordinada por el C. Sergio Rodríguez Muñoz, Director General de Medio Ambiente y supervisada por su asistente la C. Emma Arreguín López. En la **Figura 41** y **Figura 42** se ilustra el suministro de residuos domiciliarios a la planta piloto.



Figura 41. Personal de la Dirección General de Medio Ambiente



Figura 42. Traslado de residuos orgánicos domiciliarios

Los residuos orgánicos recibidos en la 3PBg se pesaron antes de ser procesados y se llevó un registro de los valores obtenidos. En la **Tabla 38** se presentan las cantidades suministradas de FORSU a cada tipo de reactor anaerobio.

Tabla 38. Cantidad de residuos orgánicos suministrada

Digestión anaerobia	Tipo de sustrato	Porcentaje aprovechable para digestión anaerobia	FORSU suministrado [t]
DAH	Mercados y tianguis	88.91%	19.30
	Domiciliarios	85.66%	5.37
	TOTAL		<b>24.67</b>

El porcentaje de aprovechamiento del residuo se obtuvo como resultado de la diferencia del peso inicial del residuo suministrado y de los residuos rechazados. Como se aprecia en la **Tabla 38** la cantidad de residuos orgánicos aprovechables es mayor en las fuentes de suministro de mercados y tianguis, seguido de las fuentes domiciliarias.

### 6.3.2. VALORES DE TEMPERATURA EN EL REACTOR ANAEROBIO HÚMEDO

Los procesos anaerobios, al igual que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que, a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás. En la **Tabla 39** se presentan los valores de las temperaturas de operación en el digestor húmedo y digestor seco.

Tabla 39. Temperatura promedio en el digestor húmedo

Parámetro	DAH	
	Mercados y tianguis	Domiciliario
<b>Máximo</b>	36.6°C	36.2°C
<b>Promedio</b>	35.2°C	33.7°C
<b>Mínimo</b>	33.6°C	31.2°C

En la **Tabla 39** se observa que las temperaturas promedio de operación del digestor anaerobio húmedo, es de 35.2°C respectivamente. Este valor se encuentra dentro del intervalo mesófilo recomendado para el crecimiento de microorganismos anaerobios, el cual, oscila entre 20 y 45°C y donde el valor óptimo de operación de estos microorganismos es de 35°C (Angenent, 2002).

### 6.3.3. VALORES DE pH EN EL REACTOR ANAEROBIO HÚMEDO

El pH es un valor importante ya que este influye en el proceso de degradación de la FORSU, ya que afecta a la rapidez del proceso anaerobio y determina el tipo de microorganismos que se pueden desarrollar. En la **Figura 43** se muestra el comportamiento de pH dentro del digestor.

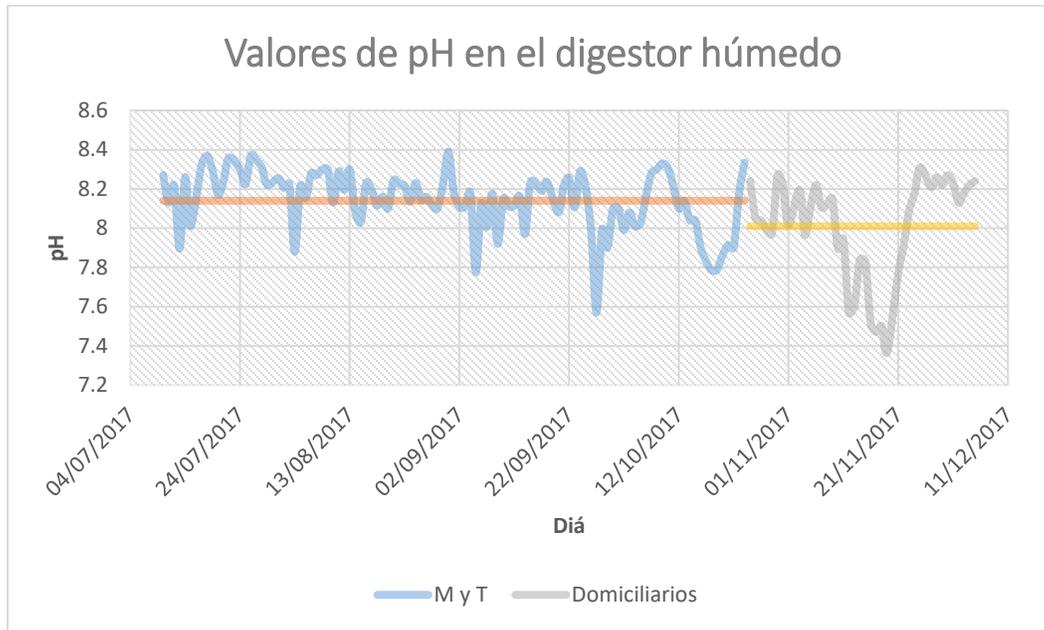


Figura 43. Valores de pH dentro del digestor anaerobio húmedo.

Como se observa en la **Figura 43**, los valores promedio de pH del digestato en el digestor anaerobio húmedo fueron de 8.14 y 8.01, en la primera y segunda etapa respectivamente. Estos valores se encuentran en el intervalo recomendado de 7 y 8.5 para el proceso de digestión anaerobia (Holliger et al., 2016).

### 6.3.4. VALORES DE AGV Y DE ALCALINIDAD EN EL REACTOR ANAEROBIO HÚMEDO

Otro valor importante que tomar en cuenta para saber la estabilidad del digestor húmedo es el índice alfa (grado de acidificación). El índice alfa, es una determinación empleada para indicar el grado de acidificación de un sistema biológico anaerobio por un aumento en la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) (Pérez y Torres, 2008). En el Anexo 9.7 se muestra la memoria de cálculo del índice alfa.

Es recomendable que el valor del factor alfa esté por arriba de 0.5, ya que, al disminuir su valor, aumentará la alcalinidad debida a AGV, y por lo tanto el sistema tenderá a la acidificación. Entre más se acerque el valor de la relación alfa a la unidad, entonces más estable será el sistema. En la **Figura 44** se muestra el índice alfa dentro del digestor en esta etapa.

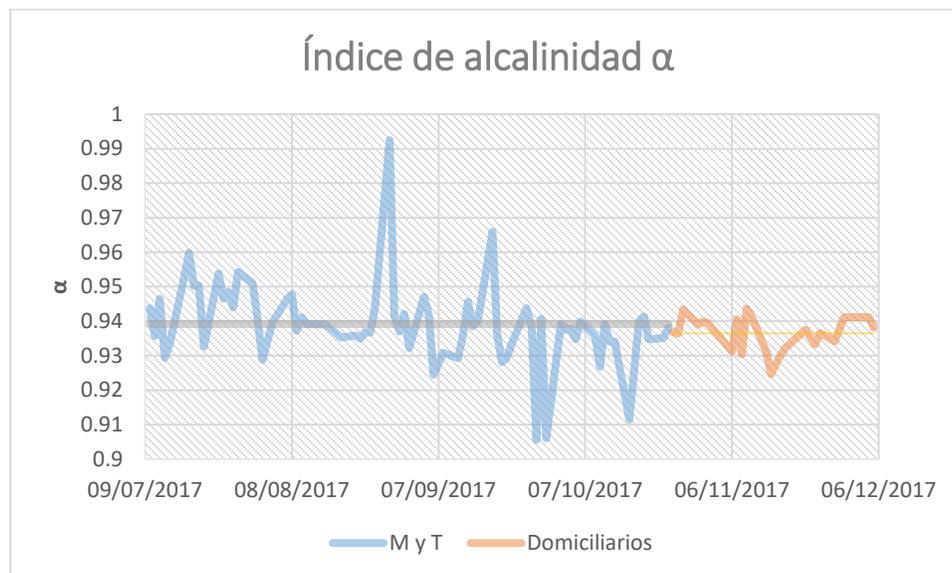


Figura 44. Índice de alcalinidad alfa en el digestor anaerobio húmedo.

Se puede observar que el valor promedio del índice alfa es de 0.94, esto quiere decir que los AGV generados por los residuos alimentados están siendo neutralizados con los bicarbonatos presentes en el inóculo (digestatos) del reactor. Por lo tanto, la alimentación del reactor anaerobio tiene la capacidad de ser alimentado todos los días.

### 6.3.5. CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL BIOGÁS PRODUCIDO.

El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas siendo la principal el sulfuro de hidrógeno. La cantidad y composición del biogás producido depende del sustrato degradado.

Durante la operación de la 3PBg se realizaron muestreos diarios de biogás para determinar el flujo y calidad de este. En la **Tabla 40** se presentan las cantidades y composición de biogás producido en el reactor de digestión anaerobia húmeda.

Tabla 40. Biogás generado en el reactor de digestión anaerobia húmeda, valores promedio

Tipo de sustrato	Composición		Volumen	
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	Producción	Rendimiento
	(%)	(%)	[Nm <sup>3</sup> /ton de FORSU]	[Nm <sup>3</sup> /ton de SV]
<b>Mercados y tianguis</b>	57%	23%	74	634
<b>Domiciliarios</b>	61%	22%	76	341

Nota: Los metros cúbicos de biogás generado reportados, son normalizados.

Con respecto al contenido de sulfuro de hidrógeno en el biogás, las lecturas que se realizaba tres veces al día a la salida del reactor siempre estuvieron por arriba del límite de detección de los detectores de campo que es de 1000 ppm, y aunque el valor representa apenas el 0.1 % de la composición del biogás, la concentración es extremadamente peligrosa para las personas. Afortunadamente, los sistemas de depuración de biogás de la 3PBg permiten reducir la concentración de H<sub>2</sub>S por debajo de 3 ppm, lo cual es un valor seguro para la salud e integridad de las personas que laboran en la planta. Esto de acuerdo con lo estipulado en la Norma Oficial Mexicana NOM-010-STPS-2014, Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo.

En la **Tabla 41** se presentan los valores resultantes del análisis estadístico de los porcentajes de composición de biogás en las dos etapas de operación del proyecto (residuo mercado y tianguis y residuo de tipo domiciliario). En esta tabla se puede observar que los porcentajes de metano encontrados en el biogás producido son aceptables de acuerdo a los valores típicos reportados en la literatura, siendo deseable en todos los casos obtener un porcentaje de metano superior a 60%. El menor porcentaje de metano se obtuvo cuando el reactor anaerobio húmedo procesaba residuos orgánicos de mercados y tianguis (47%) y el mayor porcentaje (70%) se obtuvo cuando se procesaba residuos orgánicos de tipo domiciliario.

Tabla 41. Parámetros estadísticos de los valores de porcentaje de metano en el biogás producido

<b>Parámetro</b>	<b>FORSU mercados y tianguis</b>	<b>FORSU domiciliarios</b>
<b>Desviación estándar</b>	4%	7%
<b>Moda</b>	56%	60%
<b>Mínimo</b>	47%	48%
<b>Máximo</b>	69%	70%

En diversas fuentes bibliográficas se reporta que la composición del biogás, producto de la digestión anaerobia, se encuentra en el intervalo de 50 a 70% de metano (CH<sub>4</sub>) y de 30 a 40% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), en volumen (Fernández, 2010). El porcentaje de metano obtenido en la operación de la planta, a partir del tratamiento anaerobio de los residuos, es muy similar y se encuentra en el porcentaje reportado en literatura. Esto indica que los residuos generados en el municipio de Naucalpan de Juárez presentan un potencial de generación de metano (CH<sub>4</sub>) aceptable y, por lo tanto, se visualiza factible aprovechar la FORSU de este municipio para la obtención de biogás y posterior producción de energía. Lo cual conllevaría a una considerable disminución de la cantidad de residuos que se disponen en rellenos sanitarios, y por ende una disminución en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI).

### 6.3.6. GENERACIÓN ELÉCTRICA

Existen diversas opciones para la utilización del biogás obtenido en plantas de digestión anaerobia que procesan FORSU, las principales son para producción de energía eléctrica en ciclos combinados o para la inyección en líneas municipales de gas natural, para su posterior uso doméstico, industrial o de transporte. En el caso de la 3PBg, el biogás se emplea actualmente en la generación de energía eléctrica, con una visión de tipo demostrativo y no como un fin en sí mismo. En un futuro cercano se visualiza dotar a la 3PBg de un sistema de enriquecimiento de biogás para su posterior compresión y envasado, esto con el fin de utilizar el biogás en instalaciones universitarias como gas combustible.

Es importante mencionar en la 3PBg se cuenta con un solo sistema de almacenamiento de biogás en el que se mezclan las corrientes de biogás provenientes tanto del digestor húmedo como de los secos. Posteriormente, el biogás pasa por una trampa de condensados y por dos columnas de eliminación de H<sub>2</sub>S por reacción química con un material ferroso. El biogás así depurado es suministrado al generador eléctrico el cual cuenta con un motor de combustión interna. En la **Tabla 42** se muestra la generación de energía eléctrica por tipo de sustrato.

Tabla 42. Generación de energía eléctrica por sustrato.

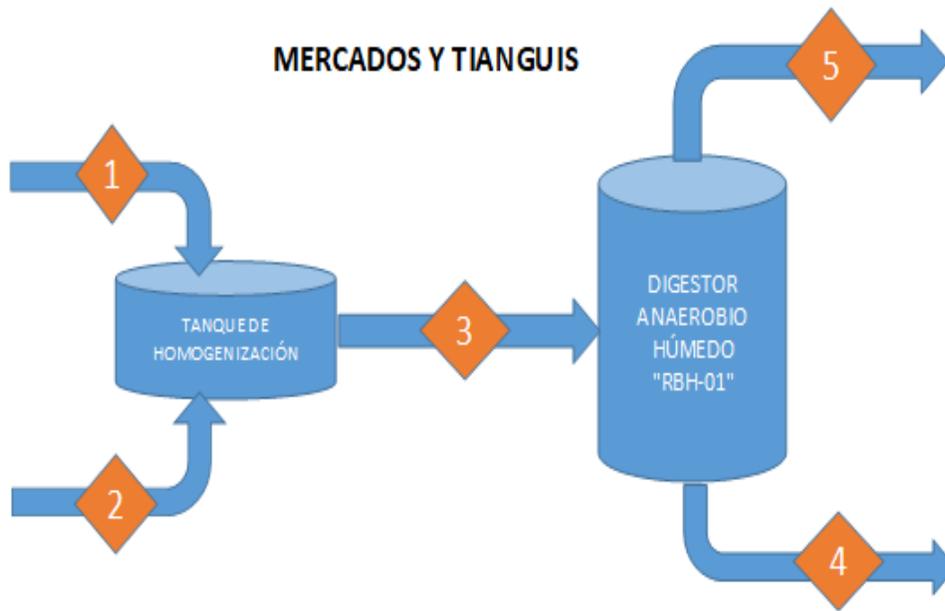
<b>Sustrato</b>	<b>Electricidad generada (kWh/ton)</b>
<b>Tianguis y mercados</b>	112.27
<b>Domiciliario</b>	124.70

Nota: En el ANEXO 9.8 se muestra la metodología empleada para determinar los valores de generación eléctrica con el biogás producido a partir de los distintos sustratos.

En la **Tabla 42** se aprecia que con el biogás producido con los residuos domiciliarios se ha generado 3.2% más energía por tonelada de FORSU con respecto al caso de los residuos provenientes de mercados y tianguis. No se trata de una diferencia significativa, pero en todo puede atribuirse a que estos residuos tienen un mayor porcentaje de sólidos volátiles (22.23%) con respecto a los residuos de mercados y tianguis (11.6%), es decir, la cantidad de materia orgánica susceptible de ser transformada en biogás y posteriormente en energía eléctrica es mayor por tonelada de residuos domiciliarios con respecto a los residuos de mercados y tianguis.

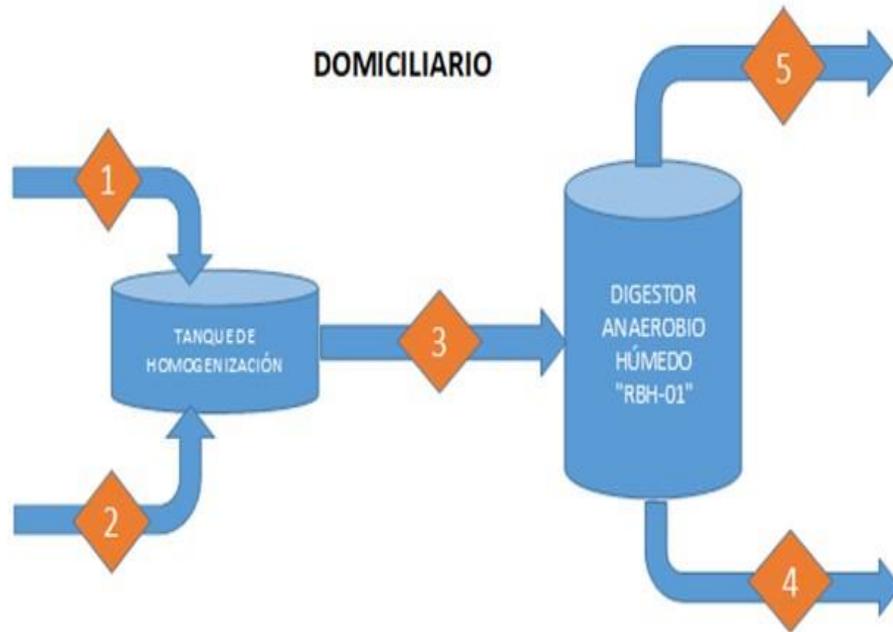
#### 6.3.7. BALANCE DE MATERIA PARA EL DIGESTOR ANAEROBIO HÚMEDO.

Con base en los resultados obtenidos de la operación de la planta piloto, se realizaron los balances de materia para el sistema de digestión húmeda con los sustratos de tianguis y mercados y residuos orgánicos domiciliarios. Estos balances de materia están referidos a un día de alimentación promedio, y la caracterización de cada corriente de proceso es el promedio reportado en la operación con cada sustrato, ya sea de tianguis y mercados o domiciliarios. En la **Figura 45** y **Figura 46** se muestra el balance de materia para los distintos tipos de residuos orgánicos.



	Unidades	FORSU	Agua de dilución	FORSU diluida	Lodo	Biogás
Corriente		1	2	3	4	5
Flujo	kg	422.9	258.6	681.5	648.1	33.5
Humedad	% (m/m)	87.2	100	92.1	98.1	-----
ST	% (m/m)	12.8	-----	7.9	1.9	-----
SV	% (m/m)	11.6	-----	7.2	1.0	-----
SF	% (m/m)	1.2	-----	0.7	0.9	-----
DQO	gO <sub>2</sub> /kg	294.1	-----	182.5	149.4	-----
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	g/kg	0.7	-----	0.4	1.4	-----
P total	g/kg	25.2	-----	15.6	2.8	-----
Alcalinidad	gCaCO <sub>3</sub> /kg	4.5	-----	2.8	7.8	-----
AGV's	gCH <sub>3</sub> COOH/kg	7.6	-----	4.7	0.5	-----
CH <sub>4</sub>	% (v/v)	-----	-----	-----	-----	57.1
CO <sub>2</sub>	% (v/v)	-----	-----	-----	-----	23.3
N <sub>2</sub>	% (v/v)	-----	-----	-----	-----	12.3
H <sub>2</sub> S	% (v/v)	-----	-----	-----	-----	0.1
H <sub>2</sub> O	% (v/v)	-----	-----	-----	-----	7.3

Figura 45. Esquema simplificado y balance de la operación del biodigestor húmedo, para residuos de mercados y tianguis.



	Unidades	FORSU	Agua de dilución	FORSU diluida	Lodo	Biogás
Corriente		1	2	3	4	5
Flujo	kg	373.5	292.7	666.1	636.5	29.6
Humedad	% (m/m)	74.4	100.0	85.7	97.6	-----
ST	% (m/m)	25.6	-----	14.3	2.4	-----
SV	% (m/m)	22.2	-----	12.5	1.4	-----
SF	% (m/m)	3.3	-----	1.9	1.0	-----
DQO	gO <sub>2</sub> /kg	228.1	-----	127.9	104.7	-----
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	g/kg	0.8	-----	0.4	2.1	-----
P total	g/kg	28.0	-----	15.7	5.1	-----
Alcalinidad	gCaCO <sub>3</sub> /kg	3.7	-----	2.1	8.1	-----
AGV's	gCH <sub>3</sub> COOH/kg	5.5	-----	3.1	3.8	-----
CH <sub>4</sub>	% (v/v)	-----	-----	-----	-----	60.6
CO <sub>2</sub>	% (v/v)	-----	-----	-----	-----	20.9
N <sub>2</sub>	% (v/v)	-----	-----	-----	-----	11.8
H <sub>2</sub> S	% (v/v)	-----	-----	-----	-----	0.1
H <sub>2</sub> O	% (v/v)	-----	-----	-----	-----	6.72

Figura 46. Esquema simplificado y balance de la operación del biodigestor húmedo, para residuos orgánicos domiciliarios.

En el esquema se muestra la operación del biodigestor húmedo. El residuo triturado se mezcla con agua para lograr las condiciones de humedad necesarias dentro del biodigestor (humedad  $\geq 90\%$ ); la mezcla resultante se alimenta al biodigestor húmedo, de este equipo salen dos corrientes, una de biogás y otra de digestato.

## 6.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN HÚMEDA DE LA PLANTA PILOTO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (3PBg)

### 6.4.1. Determinación de Costos Variables

#### 6.4.1.1 Cálculo del costo por concepto de consumo eléctrico

El monto a pagar por concepto de energía eléctrica se obtuvo del valor de consumo de energía eléctrica de la 3PBg (**Tabla 26**) y se calculó tomando en cuenta la Tarifa 2 de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el cual se aplicará a todos los servicios que destinen la energía en baja tensión a cualquier uso, con demanda hasta de 25 kilowatts. Las cuotas aplicables de la tarifa 2 de CFE se mencionan a continuación:

- 1 Cargo fijo: **\$ 65.93**
- 2 Cargos adicionales por energía consumida:
  - **\$ 2.610** por cada uno de los primeros 50 kilowatts-hora.
  - **\$ 3.147** por cada uno de los siguientes 50 kilowatts-hora.
  - **\$ 3.469** por cada kilowatt-hora adicional a los anteriores.

En la **Tabla 43** se muestra los costos por concepto de consumo de energía eléctrica en la 3PBg.

Tabla 43. Costo por el consumo eléctrico en la 3PBg.

Tarifa Referencia	días	Consumo*	0-50 kW-h \$2.61	51-100 kW-h \$3.147	kW-h Adicional \$3.469	Cargo Fijo \$65.93	Importe sin IVA \$MXN	IVA 16%	Importe con IVA \$MXN
Tarifa 2 Baja Tensión									
Bimestre 1	59.00	11,765.60	\$130.50	\$157.35	\$40,467.98	\$65.93	\$40,821.76	\$6,531.48	\$47,353.24
Bimestre 2	61.00	12,164.44	\$130.50	\$157.35	\$41,851.53	\$65.93	\$42,205.31	\$6,752.85	\$48,958.16
Bimestre 3	61.00	12,164.44	\$130.50	\$157.35	\$41,851.53	\$65.93	\$42,205.31	\$6,752.85	\$48,958.16
Bimestre 4	62.00	12,363.85	\$130.50	\$157.35	\$42,543.31	\$65.93	\$42,897.09	\$6,863.53	\$49,760.62
Bimestre 5	61.00	12,164.44	\$130.50	\$157.35	\$41,851.53	\$65.93	\$42,205.31	\$6,752.85	\$48,958.16
Bimestre 6	61.00	12,164.44	\$130.50	\$157.35	\$41,851.53	\$65.93	\$42,205.31	\$6,752.85	\$48,958.16
<b>Nota (*): No se considera un % adicional como variación</b>						<b>IMPORTE TOTAL CON IVA:</b>			<b>\$292,946.50</b>

Nota: El monto por el consumo de energía eléctrica se determinó con precios de la CFE del año del 2017.

#### 6.4.1.2 Costo por concepto de consumo de reactivos.

A partir de los datos de consumo de reactivos (ver **Tabla 27**) y de los costos unitarios de cada uno de los reactivos utilizados en la operación del sistema de digestión anaerobia húmeda se determinó el costo por el concepto de consumo de reactivos (ver **Tabla 1**).

Tabla 44. Cantidad y costo de reactivos empleado en la operación de la 3PBg.

Denominación	Pureza kg activo /kg prod comercial	Cantidad producto comercial	Precio Unitario		Importe sin IVA	IVA	Importe con IVA
		kg/a (*)	\$MXN/kg		\$MXN/a	16%	\$MXN/a
<b>Emulsión Catiónica</b>	47%	172.46	\$	61.78	\$ 10,654.06	\$ 1,704.65	\$12,358.71
<b>Bicarbonato de Sodio</b>	97%	1,208.62	\$	86.74	\$104,833.77	\$ 16,773.40	\$121,607.17
<b>Costo Total por consumo de reactivos</b>							<b>\$133,965.88</b>

Nota: El monto por el consumo de reactivos se determinó con precios del año del 2014 actualizado al 2019 tomado en cuenta la inflación de 20.47%(inflación de octubre del 2014 a julio del 2019)..

#### 6.4.1.3 Costo por concepto de consumo de Gas LP.

A partir de los valores de calor estimados para mantener la temperatura mesofílica en el reactor húmedo (Ver **Tabla 28**) y tomado en cuenta el valor de poder calorífico del gas LP y el precio de este se determinó el costo por el concepto de consumo de gas LP empleado para el sistema de calentamiento de la 3PBg. En la **Tabla 45** se muestra los montos por consumo de gas LP para mantener la temperatura mesofílica en el reactor anaerobio húmedo.

Tabla 45. Monto por concepto de consumo de gas LP.

<b>Operación</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
<b>Poder calorífico del gas LP</b>	11000	kcal/kg
<b>Conversión a BTU</b>	3.96567	BTU/kcal
<b>Poder calorífico del gas LP</b>	43622.37	BTU/kg
<b>kilos de gas LP para calentamiento</b>	0.911	kg
<b>Densidad de gas LP</b>	0.540	kg/l
<b>Número de veces que se calienta el reactor</b>	6	ocasiones/d
<b>Litros de gas LP totales para calentamiento</b>	10.12	l/d
<b>Días de operación al mes</b>	30.42	d
<b>Litros de gas LP al mes</b>	307.985	l
<b>Costo Unitario de gas LP (\$/L)</b>	9.37	\$/l
<b>Sub total mensual</b>	2,885.82	\$
<b>IVA</b>	461.73	\$
<b>Monto total al mes por gas LP</b>	3,347.55	\$
<b>Monto total anual por gas Lp</b>	40,170.56	\$

Nota: El monto por el consumo de gas LP se determinó con precios del mes de febrero del 2019.

#### 6.4.1.4 Costo por concepto de consumo de agua.

Con base en el consumo de agua reportado en la **Tabla 29** para la operación del sistema de digestión húmeda y las tarifas de costo para este recurso, el cual se menciona en la Gaceta del Gobierno del Estado de México del año 2017 permito determinar el costo por el concepto de agua de la 3PBg. En la **Tabla 46** se presenta el costo anual por el consumo de agua en la planta.

Tabla 46. Costo anual por concepto de consumo de agua en la 3PBg.

<b>Consumo de agua Mínimo [m3]</b>	<b>Consumo de agua Adicional [m3]</b>	<b>No. De Salarios</b>	<b>Salario SMGM</b>	<b>Importe [MXN]</b>
<b>150.01</b>		82.569	\$102.68	\$8,478.18
	32.49	0.9	\$102.68	\$3,002.47
<b>Subtotal</b>				\$11,480.65
<b>IVA</b>				\$1,836.90
<b>Total Bimestre por consumo de agua</b>				\$13,317.55
<b>TOTAL ANUAL POR CONSUMO DE AGUA</b>				\$79,905.33

Nota 1: S.M.G.M. Establecidos por la Comisión Nacional de los Salarios Mínimos (CONASAMI) mediante resolución publicada en el Diario Oficial de la Federación del 26 de diciembre de 2017. Vigentes a partir del 1 de enero de 2018. El valor de salario mínimo tomando en cuenta para este cálculo es de \$102.68 pesos.

Nota 2: El monto por el consumo de agua se determinó con precios del mes de diciembre del 2018.

#### 6.4.2 Determinación de costos fijos

##### 6.4.2.1 Costos por el concepto de mano de obra.

Con base en la información de la **Tabla 31** y la tasa de impuestos establecidos por el SAT se determinó el pago mensual con la retención de impuestos. En la **Tabla 47** se muestra el valor mensual con retención de impuesto que regula el Servicio de Administración Tributaria (SAT).

Tabla 47. Costo por el concepto de pago del personal de apoyo con impuestos

Concepto	Monto mensual por persona por persona [MXN]
<b>Valor unitario</b>	\$ 8,493.36
<b>IVA (16%)</b>	\$ 1,358.94
<b>ISR retenido (10%)</b>	\$ 849.34
<b>IVA retenido (10.67%)</b>	\$ 905.96
<b>A pagar</b>	\$ 8,097.00
<b>Pago con impuestos (1 persona)</b>	\$ 9,852.30

En la **0** se muestra el monto total por el concepto de mano de obra.

Tabla 48. Costo Total por el pago de personal de apoyo de la 3PBg.

Trabajador	Monto [MXN]	IVA [MXN]	Total mensual [MXN]	Monto anual [MXN]
<b>1</b>	\$8,493.36	\$1,358.94	\$9,852.30	\$118,227.60
<b>2</b>	\$8,493.36	\$1,358.94	\$9,852.30	\$118,227.60
<b>3</b>	\$8,493.36	\$1,358.94	\$9,852.30	\$118,227.60
<b>Total</b>			\$29,556.90	\$354,682.80

#### 6.4.2.2 Costo por el suministro de FORSU

El costo del suministro de residuos a la planta piloto se obtuvo de la empresa que cumpliera con los requisitos solicitados y que presento la mejor oferta Técnico-Económica para la ejecución del servicio solicitado. En la **Tabla 49** se menciona el costo por el concepto por el traslado de FORSU a la 3PBg.

Tabla 49. Costo por el concepto de traslado de material orgánico a la planta piloto.

<b>Concepto</b>	<b>Unidad</b>	<b>Sueldo base</b>	<b>Sueldo integrado</b>	<b>Sub total</b>	<b>Total mensual</b>	<b>Total anual</b>
<b>Operador (2)</b>	Mes	\$6,416.50	\$1,026.64	\$7,443.14	\$14,886.28	\$178,635.36
<b>Recolección/retiro</b>	km/mes	1,800.00	6.94	\$12,492.00	\$12,492.00	\$149,904.00
<b>Disposición final</b>	ton/mes	9.6	240	\$2,304.00	\$2,304.00	\$27,648.00
<b>Costo de administración</b>	Mes			\$3,202.35	\$3,202.35	\$38,428.20
<b>Costo indirecto (5.0%)</b>	Mes			\$2,134.90	\$2,134.90	\$25,618.80
<b>Total</b>					<b>\$35,019.53</b>	<b>\$420,234.36</b>

Nota: El costo de traslado de FORSU a la planta se basaron en la cotización de una empresa especializada en traslado de residuos del año 2018

### 6.4.2.3 Costo de depreciación de la planta

Costos por la obsolescencia progresiva de planta piloto (depreciación) se muestra en la **Tabla 50**.

Tabla 50. Costo por concepto de depreciación de la 3PBg.

DEPRECIACIÓN PLANTA/Etapa	1	2	3	4	5	6
Método para el cálculo de la depreciación	Método de depreciación de suma de dígitos anuales (SDA)					
Valor de la inversión planta piloto (P)	\$2,995,773.53					
Valor residual (30%), valor después de la vida útil (VS)	\$898,732.06					
Vida útil (n)	10					
SDA: Suma de dígitos anuales [SDA=(n*(n+1))/2]	55					
Fechas por Etapa	6 sept 16-5 mar 17	6mar17 - 5sept17	6sept17-5mar18	6mar18-5sept18	6sept18-5mar19	6mar19-5sept19
Días del uso de la planta por periodo	161/20	184	161/20	184	161/20	184
Año//Periodo de depreciación // Depreciación diaria						
año (0) 13/02/2015; Depreciación diaria = \$0.00/365 días= \$ 0.00						
año (1) 14/02/2015 al 13/02/2016; Depreciación diaria = \$381,280.27/365 días= \$1,044.60						
año (2) 14/02/2016 al 13/02/2017; Depreciación diaria = \$343,152.24/365 días= \$940.14	\$151,363.04					
año (3) 14/02/2017 al 13/02/2018; Depreciación diaria = \$305,024.21/365 días= \$835.68	\$16,713.66	\$153,765.63	\$134,544.93			
año (4) 14/02/2018 al 13/02/2019; Depreciación diaria = \$266,896.19/365 días= 731.22			\$14,624.45	\$134,544.93	\$117,726.81	
año (5) 14/02/2019 al 13/02/2020; Depreciación diaria = \$228,768.16/365 días= \$626.76					\$12,535.24	\$115,324.22
año (6) 14/02/2020 al 13/02/2021; Depreciación diaria = \$190,640.13/365 días= \$522.30						
<b>Depreciación total por Etapa</b>	\$168,076.70	\$153,765.63	<b>\$149,169.38</b>	\$134,544.93	\$130,262.05	\$115,324.22

Como se observa en la **Tabla 50** la depreciación de la planta piloto es diferente con el paso del tiempo. Sin embargo, para este proyecto se considera la depreciación de la Etapa 3, el cual, tiene un monto de \$149,169.38 MXN, este valor se toma en cuenta para la determinación del costo de operación de la 3PBg debido a que en esta Etapa se obtuvo los mejores resultados de operación y son los mismos que describen en este documento de tesis.

#### 6.4.3 DETERMINACIÓN COSTO DE OPERACIÓN DE LA 3PBg.

En la **Tabla 51** se muestra los costos erogados en la operación mensual y anual en la operación del sistema de digestión húmeda de la 3PBg.

Tabla 51. Monto erogado por operación del sistema de digestión húmeda.

Concepto	Monto mensual (MXN)	Monto anual (MXN)
Costo directo		
Gas LP	\$3,347.55	\$ 40,170.56
Agua	\$6,658.78	\$ 79,905.33
Reactivos	\$11,163.82	\$ 133,965.88
Electricidad	\$24,412.21	\$ 292,946.50
Total directo	\$45,582.36	\$ 546,988.27
Costo indirecto		
Mano de obra	\$29,556.90	\$ 354,682.80
FORSU	\$35,019.53	\$ 420,234.36
Depreciación de la 3PBg	\$12,430.78	\$ 149,169.37
Total indirecto	\$77,007.21	\$ 924,086.53
Total	\$122,589.57	\$1,471,074.80

Como se observa en la **Tabla 51** el monto mensual erogado por la operación de la planta piloto es \$122,589.57. Sin embargo, este monto puede variar y dependerá de los precios de los insumos y servicios cotizados.

En la **Figura 47** se muestra el porcentaje asociado a cada rubro evaluado en la operación del sistema de digestión húmeda de la planta piloto.

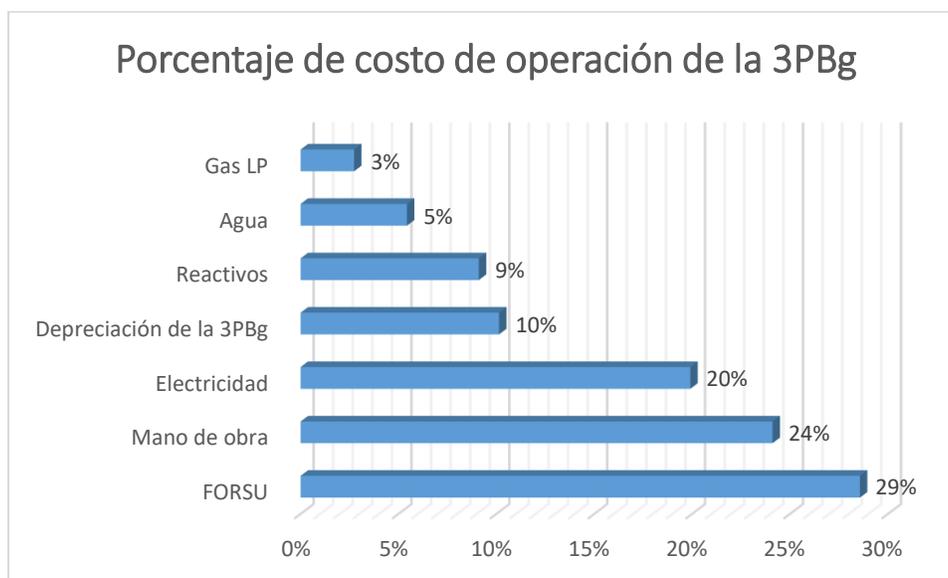


Figura 47. Porcentaje de distribución de gastos en la 3PBg

Como se observa en la **Tabla 51**, el rubro de traslado de la FORSU consume el 29% de los recursos económicos de la operación de la planta, seguido de los costos de mano de obra y consumo de energía eléctrica con un valor de 24% y 20%, respectivamente.

Con base en los datos de operación de la 3PBg y los costos totales asociados a la operación se determinó el costo de operación de la planta, el costo por tonelada de FORSU tratado y el costo por m<sup>3</sup> de biogás generado. En la **Tabla 52**, se muestra los costos por tratar residuo de residuo de mercados y tianguis del municipio de Naucalpan de Juárez.

Tabla 52. Costo de operación de la 3PBg con residuo de mercados y tianguis.

Mes de operación	FORSU suministrado [kg/mes]	Costo de operación [\$/mes]	Costo por tonelada de FORSU tratado [\$/ton FORSU]	Costo por m3 de biogás producido [\$/m <sup>3</sup> biogás]
1	4,528.00	\$122,590	\$25,120	\$473
2	6,054.00	\$122,590	\$18,788	\$181
3	4,771.00	\$122,590	\$23,841	\$295
4	3,945.26	\$98,407.43	\$23,143	\$555
<b>Total</b>	<b>19,298.26</b>	<b>466,176.13</b>		

En la **Tabla 53** se muestra los costos por tratar residuo de residuo de tipo domiciliario del municipio de Naucalpan de Juárez.

Tabla 53. Costo de operación de la 3PBg con residuo de tipo domiciliario.

Mes de operación	FORSU suministrado [kg/mes]	Costo de operación [\$/mes]	Costo por tonelada de FORSU tratado [\$/ton FORSU]	Costo por m3 de biogás producido [\$/m <sup>3</sup> biogás]
1	886.74	\$24,182.13	\$26,263	\$300
2	4,485.00	\$122,590	\$26,323	\$358
<b>Total</b>	<b>5,371.74</b>	<b>146,771.70</b>		

## 7.CONCLUSIONES

A partir del planteamiento general de este trabajo, considerando los objetivos previstos, y teniendo en cuenta los resultados experimentales obtenidos y la discusión realizada, en este apartado se detallan las principales conclusiones de este proyecto.

Respecto al objetivo **“Evaluar técnica y económicamente la producción de biogás a nivel planta piloto a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) tratados en un reactor anaerobio húmedo”**

La generación de residuos sólidos urbanos a nivel nacional ha aumentado 61.2% con respecto al año 2003. El aumento en la generación de residuos sólidos urbanos puede explicarse como resultado de múltiples factores, reconociéndose entre los más importantes el crecimiento urbano, el desarrollo industrial, las modificaciones tecnológicas y el cambio en los patrones de consumo de la población. A nivel nacional el 74.5% (39.56 millones de toneladas) de RSU se envían a disposición final en rellenos sanitarios, de los cuales, 20.73 millones de toneladas son de material orgánico susceptibles de ser aprovechados en tecnologías que transformen la fracción orgánica de los RSU para producir de forma directa electricidad o calor, o para generar combustibles gaseosos, líquidos o sólidos.

La digestión anaerobia es una alternativa tecnológica empleada a nivel internacional para el manejo de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) y a su vez aprovechar el potencial energético para producir biocombustibles (biogás),

Por tal motivo, se llevó a cabo la evaluación de la producción de biogás a partir de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) mediante la operación continua del sistema de digestión húmeda de la planta piloto de producción de biogás (3PBg) de la Facultad de Química de la UNAM y sustratos provenientes del municipio de Naucalpan de Juárez, Estado de México. Esto a fin

de determinar si la tecnología de digestión anaerobia húmeda instalada en la 3PBg se encuentra en los niveles internacionales de producción y costo de biogás.

A partir de los resultados obtenidos durante la operación de la 3PBg se determinó que: el sistema de digestión anaerobia húmeda de la planta piloto produce alrededor de 74 a 76 Nm<sup>3</sup> de biogás por tonelada de FORSU, con tiempos de retención hidráulica (TRH) de 21 días, con un contenido en Sólidos Totales el 10% y temperatura de operación mesófila (35°C), con lo cual, produce entre 112.27 a 124.70 kWh por tonelada. Estos valores de producción de biogás ubican la tecnología de digestión húmeda de la 3PBg al nivel de empresas de talla internacional, como son: BTA que produce entre 85 a 105 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de residuos tratado, con tiempos de retención hidráulica (TRH) de 14 a 15 días, con un contenido en Sólidos Totales de 10 a 12 % y temperatura de operación mesófila que van de 37 a 38°C), con lo cual, produce 175 a 220 kWh por tonelada; y Strabag que produce entre 92 a 105 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de residuos tratado, con tiempos de retención hidráulica (TRH) de 20 a 21 días, con un contenido en Sólidos Totales de 9 a 12 % y temperatura de operación mesófila que van de 36 a 37°C), con lo cual, produce 220 a 255 kWh por tonelada.

En lo referente a la evaluación económica, se tomó en cuenta el costo de generación eléctrica, ya que contempla los gastos asociados a la operación de la planta y por consiguiente la obtención de energía eléctrica obtenida. El costo de generar energía eléctrica en la 3PBg tiene un valor de 204.41 a 232.66 pesos por kWh generado, este costo es elevado comparado a lo reportado por la SENER (2012) para la generación de energía eléctrica a partir de biomasa, en donde, el costo de generación eléctrica para el año 2010 fue de 3.74 pesos por kWh, tomando en cuenta que la inflación del 2010 al 2019 tuvo un incremento de 43.54%, el costo de generación eléctrica hoy día es de 5.37 pesos por kWh. Sin embargo, es importante mencionar que la 3PBg tiene baja capacidad tratamiento comparado con las empresas a nivel industrial y por consiguiente los costos de operación son elevados, en general estos costos se elevan debido a que la 3PBg fue concebida con el

objetivo principal de desarrollar investigación en temas de digestión anaerobia, así como formación de recursos humanos de alta especialidad, y no de crear una empresa con fines de lucro, por esta razón, es que los costos de generación de energía son más elevados que los reportados a nivel industrial.

De lo anterior se concluye que, la tecnología de digestión anaerobia húmeda instalada en la 3PBg es una alternativa que puede escalarse nivel industrial a fin enfrentar los problemas relacionados con la FORSU y su disposición final, y a su vez aprovechar los residuos para la producción de biocombustibles que pueden ser empleados en generación de energía térmica, o bien en energía eléctrica y ayudar en la creciente demanda de energía a nivel local, municipal o nacional.

Respecto al objetivo **“Evaluar la producción de biogás en la planta piloto de la UNAM, instalada en Cuautitlán Izcalli, Estado de México”**.

La razón para llevar a cabo un análisis aun sistema de digestión anaerobia, es la de determinar la cantidad y calidad de biocombustible que se puede producir a partir de un sustrato, y a su vez, sirve para determinar el estado de salud del digestor, ya que a mayor producción de biogás y mayor composición de metano ( $\text{CH}_4$ ) en el flujo biogás, garantiza la estabilidad del sistema de digestión anaerobia.

Por tal motivo, la evaluación de la producción biogás en la 3PBg vía digestión anaerobia húmeda se llevó a cabo en dos etapas; la primer etapa consistió en realizar pruebas a nivel laboratorio de potencial bioquímico de metano, esto con la fin de determinar el volumen máximo de metano que se puede obtener de los distintos sustratos y bajo condiciones controladas; y la segunda etapa consistió en la operación del sistema piloto de digestión anaerobia húmeda. Para esta evaluación se emplearon dos tipos de sustratos; residuo de tipo domiciliario y residuos procedentes de mercados y tianguis, los cuales, se obtuvieron del municipio de Naucalpan de Juárez, Estado de México.

Los resultados de la evaluación de producción de biogás en la 3PBg son los siguientes:

- ✓ La producción de biogás en la 3PBg vía digestión húmeda, empleando sustrato de mercados y tianguis, es de 74m<sup>3</sup> por tonelada, con una composición promedio de: 57 % y 23% de metano (CH<sub>4</sub>) y bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), respectivamente, con trazas de sulfuro de hidrógeno (0.1%). Las pruebas de potencial bioquímico de metano (PBM), indican que la producción de biogás máxima para este tipo de residuo en condiciones controladas es de 78 m<sup>3</sup> por tonelada. Por lo tanto, el porcentaje de eficiencia de producción de biogás en la planta piloto vía digestión húmeda para este tipo de sustrato es de 94 %.
  
- ✓ La producción de biogás en la 3PBg vía digestión húmeda, empleando sustrato de tipo domiciliario es de 76 m<sup>3</sup> por tonelada, con una composición promedio de: 60 % y 22% de metano (CH<sub>4</sub>) y bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), respectivamente, con trazas de sulfuro de hidrógeno (0.1%). Las pruebas de potencial bioquímico de metano (PBM), indican que la producción de biogás máxima para este tipo de residuo en condiciones controladas es de 93 m<sup>3</sup> por tonelada de FORSU. Por lo tanto, el porcentaje de eficiencia de producción de biogás en la planta piloto vía digestión húmeda para este tipo de sustrato es de 81 %.

Respecto al objetivo **“Establecer las mejores condiciones de operación para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en la planta piloto de digestión anaerobia de la UNAM.”**.

En el desarrollo de este proyecto se identificaron acciones y condiciones operativas que repercutían de forma negativa en la operación de la 3PBg, las repercusiones afectaban el tiempo de procesamiento de la FORSU hasta la disminución en la cantidad y calidad del biogás producido. Las condiciones de operación identificadas en la evaluación de este proyecto se mencionan a continuación:

- Suministro de residuos: El suministro constante del material orgánico permite mantener las condiciones de operación del sistema de digestión anaerobia y por ende una producción constante de biogás.
- Selección y separación de residuos desde origen: Esto garantiza que el residuo que se suministra a la planta piloto sea en su mayoría material susceptible para el proceso de digestión anaerobia. Esta acción permite disminuir el tiempo en la etapa de pretratamiento de la FORSU, con lo cual, se logra disminuir el consumo de energía eléctrica en la operación, y a su vez abatir costos de operación, y por lo tanto, disminuir el costo de generación de energía eléctrica.
- Pretratamiento del residuo: El tratamiento de la FORSU a tomar en cuenta para el proceso de digestión húmeda es la disminución de tamaño de partícula a 5 mm, con lo cual se incrementa la superficie disponible del sustrato con los microorganismos, lo que ayuda a mejorar el proceso biológico.
- Alimentación: Para el sistema de digestión húmeda se debe garantizar una alimentación con 10% sólidos totales (ST), ya que a menor cantidad de ST menor cantidad de material orgánico disponible y por consecuencia menor producción de biogás. En el caso de residuos con sólidos totales inferior al 10% se recomienda adicionar un sustrato que eleve el porcentaje de sólidos disponibles para la digestión húmeda.
- Temperatura de operación: La temperatura es un factor importante en el proceso de digestión anaerobia a condiciones mesofílicas, por lo tanto, la revisión constante de este parámetro dentro del digestor es fundamental para garantizar una producción adecuada de biogás, ya que la disminución o incremento la temperatura de operación del sistema de digestión húmeda (35 C°) impacta de forma negativa sobre la producción y composición de biogás.
- pH de lodo: Realizar medición periódica de pH del lodo dentro del digestor, esto con la finalidad de monitorear este parámetro, ya que altos valores de pH, en la operación del sistema de digestión de la 3PBg se observó que a pH cercanos a 8.5 la producción y concentración composición de biogás

disminuye. Esto se debe a que pH elevados se favorece el incremento de concentración de amonio libre y esto puede inhibir el metabolismo metanogénico

- Determinación de índice alfa: Este valor es esencial en la operación del sistema de digestión húmeda, ya que este parámetro es un indicativo de que los Ácidos Grasos Volátiles (AGV) generados por los residuos alimentados están siendo neutralizados con los bicarbonatos presentes en el lodo. Se recomienda que el índice alfa tenga un valor cercano a la unidad, esto quiere decir que la operación del sistema de digestión húmeda es estable y por lo tanto puede aceptar cargas orgánicas más altas y por consecuencia producir más biogás; en caso de presentar valores de índice alfa cercano a 0.5 es necesario dejar de alimentar residuo orgánico y adicionar bicarbonatos que ayude a contrarrestar los AGV presentes en el sistema, con lo cual, se evitar que el sistema de digestión se acidifique; valores de índice alfa menores a 0.5 es un indicativo que el sistema de digestión húmeda ya se acidifico y no se recomienda llegar a estos valores, ya que el sistema de digestión tiene muchas probabilidades de inhibirse. Por lo tanto, para garantizar el buen funcionamiento del sistema de digestión húmeda es fundamental el realizar determinaciones diarias del índice alfa, y así conocer el estado de salud del digestor.
- Tomas de muestra de biogás: Realizar análisis periódicos de biogás producido, ya que este valor es un indicativo del estado de salud del digestor, valores de 50% o menos en volumen de metano ( $\text{CH}_4$ ) durante periodos prolongado significa que el sistema de digestión está entrando en una fase de inhibición, y por lo tanto, se debe realizar un análisis fisicoquímico de la FORSU y del lodo dentro del biodigestor, así como los parámetros de operación para identificar cual está afectado la operación del sistema.

Respecto al objetivo: **“Evaluar económicamente la producción de biogás en la planta piloto de digestión anaerobia de la UNAM”**.

Uno de los objetivos de operar la 3PBg, es de determinar el costo de producción biogás a partir de la fracción urbana de los residuos sólidos urbanos. Para ello se determinó el gasto de operación del sistema de digestión húmeda de la 3PBg y la cantidad de biogás producido en cada periodo de evaluación del proyecto. A partir de los datos de producción de biogás de la 3PBg y los costos de operación de la misma, se concluye lo siguiente:

- El costo de biogás producido a nivel planta piloto varia de \$ 376 a \$ 329 pesos por metro cubico, empleando residuos de mercados y tianguis y residuos de tipo domiciliario, respectivamente. Los costos de producción de biogás dependen en gran medida de la cantidad de FORSU procesado en la 3PBg, ya que, el 29% de los costos de operación de la planta piloto se debe a la recolección y traslado de residuo orgánico y un 20% de los costos de operación se debe al procesamiento de los residuos (energía eléctrica para activar equipos). Por lo tanto, el procesar cantidades de residuo orgánico inferiores a las establecidas por diseño del sistema de digestión húmeda, disminuyen el material orgánico susceptible de tratamiento, y por consecuencia disminuye la producción de biogás, lo que incrementa el costo de producción de biogás en la 3PBg.

Respecto al objetivo: **“Determinar energéticamente el consumo- producción de la planta piloto durante su operación”**.

La determinación de consumo y producción de energía eléctrica en la planta piloto se realizó se llevó acabo en dos etapas, la primer etapa consistió en identificar los equipos involucrados en la operación del sistema de digestión húmeda, el tiempo de operación de estos y la potencia de cada uno, con lo cual, se calculó el consumo energético de la planta; en la segunda etapa se calculó la generación de energía eléctrica de la 3PBg, para lo cual, es necesario determinar el consumo promedio de biogás por hora de operación del motogenerador (IVA-01), la potencia del equipo, el cual, es de 8 kW con una eficiencia de 85%, con los datos anteriores y el flujo de biogás, se concluye lo siguiente:

- A partir de los tiempos de operación de los equipos y el consumo energético de cada uno de los equipos que interviene en el proceso de digestión húmeda de la 3PBg se determinó que el consumo energético al mes de la planta piloto es de 6,065.38 kWh, esto alimentado el sistema de digestión 3 veces por semana.
- La producción de energía eléctrica en la planta piloto está ligada directamente a la producción de biogás, así como la eficiencia de equipo generador de energía (IVA-01) que emplea biogás como combustible para operar. Se estima una producción promedio mensual de 390.47 m<sup>3</sup> de biogás, con lo cual, la planta piloto genera 582.29 kWh al mes, esto equivale al 9.60 % del consumo eléctrico total del sistema de digestión húmeda de la 3PBg..

Respecto al objetivo: **“Determinar los parámetros físicos y químicos de la fracción orgánica de los RSU que ayuden a la selección adecuada de equipos en el tratamiento previo a la alimentación de digestores anaerobio a escala real”**.

La tecnología de digestión anaerobia es un sistema empleado a nivel internacional para atender el problema de disposición de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) y a su vez aprovechar el potencial energético. Para el caso de un sistema de digestión anaerobia húmeda a nivel industrial se consideran la experiencia obtenida durante la operación de la 3PBg para la selección de equipos para el tratamiento de la FORSU previo a la alimentación, los parámetros a tomar en cuenta para la selección de equipos se mencionan a continuación:

- Caracterización física: La caracterización física de los RSU para la selección de equipos para procesos de digestión a nivel industrial considera lo siguiente:
  - Determinar los subproductos que conforman los RSU, dicha información es fundamental en la selección de equipos que permitan separar los

materiales orgánicos susceptibles de aprovechar en el proceso digestión anaerobia y los materiales orgánicos e inorgánicos que no se pueden aprovechar.

- Determinar el tamaño de partícula y dureza de los residuos orgánicos susceptibles de aprovechamiento, esto a fin de seleccionar los equipos de trituración y molienda adecuados para llevar a cabo la reducción de tamaño de partícula a valores que van de 10mm a 5mm, los cuales son recomendados para procesos de digestión anaerobia húmeda. Además, dependiendo del tamaño de partícula se selecciona el equipo de transporte adecuado (tornillo helicoidal, canjilones, bomba para sólidos, etc.)
- Determinar el contenido de Sólidos Totales (ST), Sólidos Fijos (SF), Sólidos Volátiles (SV) y Humedad del material orgánico susceptible de aprovechamiento, esto con la finalidad de evaluar si el residuo orgánico contiene 10% de Sólidos Totales, el cual es adecuado para procesos de digestión anaerobia húmeda, en el caso de presentar mayor porcentaje de ST se llevará a cabo la adición de agua para garantizar el 10% de sólidos totales, por lo tanto, es necesario contar con un tanque de almacenamiento temporal, un sistema de agitación esto lleva a la selección de un tanque de almacenamiento temporal donde se lleve a cabo la toma de muestra de residuo orgánico para determinar el porcentaje de sólidos, humedad y de pH previa a la alimentación del sistema de digestión, así como equipos de agitación, instrumentos para medir el consumo de agua y equipos para medir el pH del residuo orgánico diluido,
- Caracterización química de la FORSU: La caracterización química de los RSU para la selección de equipos para procesos de digestión a nivel industrial considera lo siguiente:
  - Se determina el pH de material orgánico, esto con la finalidad de seleccionar el material de construcción adecuado para los equipos (trituradores, molienda, bombas, agitadores), tanques de

almacenamiento temporal, válvulas de control, líneas de proceso (tuberías) y accesorios que sean resistentes al ataque químico que presenta el residuo.

## CONCLUSIONES GENERALES

- ✓ La carga orgánica (CO) promedio añadida al digestor húmedo es de 1.94 y 1.54 kg SV\*m<sup>-3</sup>\*d<sup>-1</sup>, con residuo de mercados y tianguis y residuos de tipo domiciliario, respectivamente. Este valor se encuentra por debajo de la CO de diseño que es de 3.4 kg SV\*m<sup>-3</sup>\*d<sup>-1</sup>. Por lo tanto, es posible incrementar el volumen de biogás producido por tonelada de FORSU en el sistema de digestión húmeda, aumentando la CO al valor de diseño.
- ✓ El sistema de digestión anaerobia húmeda de la planta piloto está diseñada para tratar 500 kg de FORSU con un contenido de sólidos totales (ST) del 20% en promedio. Sin embargo, los residuos orgánicos de mercados y tianguis presentan 12.7% de ST, por este razón, es posible aumentar la capacidad de tratamiento del sistema de digestión húmeda de 500 kg a 820 kilogramos por día de residuos de mercados y tianguis, manteniendo la carga orgánica (CO) de diseño de 3.4 kg SV\*m<sup>-3</sup>\*d<sup>-1</sup>
- ✓ La remoción de sulfuro de hidrógeno en la planta piloto, mediante el proceso de desulfuración seca, empleando óxido de hierro (iii) ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{Fe}_2\text{S}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$ ) permite una remoción del 98%
- ✓ El suministro de residuos orgánicos fue un factor fundamental durante la operación de la 3PBg, ya que la variación en cantidad y calidad de material biodegradable en el sustrato suministrado impacta en la producción y composición de biogás. Por lo tanto, el Implementar programas de separación de residuos orgánicos desde origen, garantizaría la calidad y cantidad de material biodegradable, obteniendo mayor producción de biogás con mayor porcentaje de metano (CH<sub>4</sub>), además, de reducir los tiempos muertos (operación de equipos sin procesar residuo) durante el pretratamiento de la FORSU, lo que se traduce en disminución en el consumo de energía y por lo tanto, en dinero erogado para el pago de energía.

- ✓ Los residuos orgánicos con un porcentaje de humedad alto, deben manejarse de tal manera, que los lixiviados generados se capten y se incorporen en el proceso de digestión anaerobia, ya que cuenta materiales biodegradables, además de una elevada humedad, y por lo tanto, pueden ser aprovechados en el proceso de digestión como agua de dilución, disminuyendo la cantidad de agua cruda empleada en el pretratamiento de sustratos que se procesen mediante digestión húmeda.
- ✓ La composición del biogás generado con el proceso de digestión anaerobia húmeda con los distintos sustratos es muy similar, con valores de metano (CH<sub>4</sub>) que oscilan entre 58 y 61% y de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) con valores entre 22 y 23%. Por lo tanto, no hay razón en dar preferencia a algún sustrato en particular si el objetivo es generar biogás con una alta concentración de metano.
- ✓ El tratamiento de los residuos sólidos orgánicos por medio del proceso de digestión anaerobia aunado a la producción de biogás, brinda un tratamiento adecuado, ya que se aprovecha entre 80 y 90% de sólidos con respecto a la alimentación de sólidos suministrada, además brinda una remoción de materia orgánica del orden del 50% para los dos sustratos utilizados.
- ✓ Los resultados recopilados durante la operación de la planta piloto, muestran un rendimiento favorable para cualquiera de los residuos tratados, cabe mencionar que al ser la muestra de domiciliarios un residuo con una caracterización rica y diversa, aporta mayor cantidad de elementos como productos cárnicos que nutren los procesos y que en co-digestión con las muestras de mercados y tianguis tienen el potencial de incrementar la producción de biogás generada a partir de la mezcla de ambas.
- ✓ El rubro de costos que presenta mayor porcentaje en la operación de la planta piloto es el suministro de FORSU con un valor de \$35,019.53MXN, lo que representa el 29% sobre los costos de operación. Por lo tanto, para disminuir este costo debería de obtener el residuo orgánico de las zonas aledañas de la planta, ya que disminuye los gastos

## **8.RECOMENDACIONES**

Con base en la información técnica y datos recopilados durante la operación de la 3PBg, y los resultados de laboratorio obtenidos en el desarrollo de este proyecto, se proponen una serie de recomendaciones técnicas y operativas, que pueden mejorar el desempeño, la operación y la seguridad de la 3PBg. Así mismo, se plantean algunas recomendaciones que se deben considerar en el diseño de plantas de digestión anaerobia a nivel industrial. Dichas recomendaciones se mencionan a continuación.

Nivel de aplicación	Recomendación	Mejoras
<p style="text-align: center;">Planta piloto de producción de biogás (3PBg)</p>	<p>Reforzar, Implementar y extender la aplicación de la norma NADF-024-AMBT-2013 “los criterios y especificaciones técnicas bajo los cuales se deberá realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y almacenamiento de los residuos del distrito federal (ahora Ciudad de México)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incremento en el porcentaje de material orgánico disponible para el proceso de digestión anaerobia y por consecuencia un aumento en la producción de biogás.</li> <li>• Reducción en el porcentaje de residuos de rechazo (orgánicos e inorgánicos) que ese envía a sitio de disposición final.</li> <li>• Reducción en los tiempos para realizar la clasificación y procesamiento de la FORSU en planta de un 20% (valor estimado en función de los tiempos de procesamiento de la FORSU en la 3PBg)</li> <li>• Disminución en los costos de la energía eléctrica empleada durante la de operación de la planta, esta reducción se logra por reducción en los tiempos de operación de los equipos empleados en el pretratamiento (clasificación, transporte y trituración) de la FORSU</li> </ul>
<p style="text-align: center;">Planta piloto de producción de biogás (3PBg)</p>	<p>Implementar un área específica para el almacenamiento temporal de la FORSU.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contar con material orgánico en stock, lo que, permitirá la operación continua de la planta en caso de falta de suministro de FORSU.</li> </ul>

Nivel de aplicación	Recomendación	Mejoras
Planta piloto de producción de biogás (3PBg)	Emplear el biogás generado como combustible alternativo en el sistema de calentamiento (boiler).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de los costos de operación de la planta, esto mediante la reducción del consumo de gas LP empleado como combustible principal en el sistema de calentamiento.</li> </ul>
Planta piloto de producción de biogás (3PBg)	Instalar un sistema de lavado de gases (scrubbers)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elimina el CO<sub>2</sub> presente en el flujo de biogás producido, incrementando del porcentaje de CH<sub>4</sub> y por consecuencia un aumento en el poder calorífico.</li> </ul>
Planta piloto de producción de biogás (3PBg)	Envasado de biogás purificado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite tener un almacenamiento alternativo de biogás diferente al reservorio (biobolsa), lo que permitirá suministrar biogás de forma continua al motogenerador y así mantener la producción más constante de energía eléctrica.</li> </ul>
Planta piloto de producción de biogás (3PBg)	Techumbre para el equipo de almacenamiento de biogás (biobolsa)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Previene daños al reservorio de biogás (pinchaduras o ruptura), provocado por fenómenos naturales o sociales (vandalismo). Lo que, garantiza la seguridad del personal operativo y personas que transitan alrededor de la planta, además de la operación continua de la planta.</li> </ul>

Nivel de aplicación	Recomendación	Mejoras
Planta piloto de producción de biogás (3PBg)	Instalar un sistema de pararrayos punta captadora o pararrayos franklin	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mejora la seguridad de la planta al dirigir hacia tierra la descarga eléctrica producida por un rayo, de tal modo que no cause daños a las personas o construcciones.</li> </ul>

Nivel de aplicación	Recomendación	Mejoras
Planta de digestión anaerobia a nivel industrial	Construir la planta de digestión anaerobia a nivel industrial en un lugar cercano a la fuente generadora (ciudad, municipio, sitio de disposición final, etc..).	<ul style="list-style-type: none"> <li>Garantiza el suministro de materia prima y por consecuencia la operación continua de la planta.</li> </ul> <p>Reducción en los costos por el traslado de residuos orgánicos hacia la planta.</p>
Planta de digestión anaerobia a nivel industrial	El material de construcción del digestor se propone de metal (acero al carbón) con recubierto interior de vidrio	<ul style="list-style-type: none"> <li>El material metálico garantiza la estructura del digestor y el vidrio previene el ataque químico (oxidación) del material metálico.</li> </ul>
Planta de digestión anaerobia a nivel industrial	Reforzar, Implementar y extender la aplicación de la norma NADF-024-AMBT-2013 “los criterios y especificaciones técnicas bajo los cuales se deberá realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y almacenamiento de los residuos del distrito federal (ahora Ciudad de México)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incremento en el porcentaje de material orgánico disponible para el proceso de digestión anaerobia y por consecuencia un aumento en la producción de biogás.</li> <li>Reducción en el porcentaje de residuos de rechazo (orgánicos e inorgánicos) que ese envía a sitio de disposición final.</li> </ul>

Nivel de aplicación	Recomendación	Mejoras
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incremento de vida útil de sitios de disposición final, debido a la reducción de material orgánico de opositado en estos sitios por el aprovechamiento de la fracción orgánica.</li> <li>• Reducción en los tiempos para realizar la clasificación y procesamiento de la FORSU en planta de un 20% (valor estimado en función de los tiempos de procesamiento de la FORSU en la 3PBg).</li> <li>• Disminución en los costos de la energía eléctrica a emplear durante la de operación de la planta, esta reducción se logra por reducción en los tiempos de operación de los equipos empleados en el pretratamiento (clasificación, transporte y trituración) de la FORSU</li> </ul>
Planta de digestión anaerobia a nivel industrial	Líneas de recuperación y almacenamiento de lixiviados en el área de almacenamiento y pretratamiento de la FORSU.	Ayuda a disminuir el consumo de agua cruda como agua de dilución de la FORSU en el proceso de digestión húmeda. Y por lo tanto, los costos de operación de la planta pueden abatirse.
Planta de digestión anaerobia a nivel industrial	Área de exclusivas para llevar a cabo el proceso de compostaje del digestato producido.	Reducción en los costos de operación de la planta de digestión debido a la disminución de los traslados realizados a sitio de

Nivel de aplicación	Recomendación	Mejoras
		dispersión final para depositar material orgánico degradado.
Planta de digestión anaerobia a nivel industrial	Recuperación y almacenamiento de agua de lluvia para emplearlo como agua de dilución de FORSU en el proceso de digestión anaerobia, así como en servicios generales de la planta (limpieza y sanitarios).	Ayuda a disminuir el consumo de agua cruda como agua de dilución de la FORSU en el proceso de digestión húmeda. Y por lo tanto, los costos de operación de la planta pueden abatirse.
Planta de digestión anaerobia a nivel industrial	Sistema de purificación de biogás	Remoción de 98% del sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S) con base en los resultados
Planta de digestión anaerobia a nivel industrial	Instalar transmisores indicadores de temperatura a distintos niveles del digestor para determinar gradiente de temperatura	Operativamente ayuda a determinar el gradiente de temperatura en el interior del reactor, lo que permite saber si la homogenización de mezcla inóculo sustrato es adecuada.

## 9. ANEXOS

### ANEXO 9.1. MÉTODO DE CUARTEO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS.

El objetivo de este método es cuantificar las proporciones de los subproductos que integran el residuo orgánico; estos subproductos pueden ser vegetales, fruta, comida, carne, papel, cartón, metal, plástico, etc. Este método también permite estimar el peso volumétrico de los residuos.

Se basa en la norma mexicana NMX-AA-15-1985 "Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Método de cuarteo", se adaptó al cuarteo de los subproductos contenidos en el residuo orgánico (fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos).

Aparatos y equipo.

- Báscula de piso, con capacidad de 200 kg
- Dos o tres tambos metálicos de 200 L
- Palas curvas
- Overoles
- -Guantes de carnaza
- Escobas
- Botas de hule
- Cascos de seguridad
- Mascarillas protectoras

Procedimiento

- I. Se requiere la participación de cuando menos tres personas. El equipo requerido antes descrito está de acuerdo con el número de personas que participan en el cuarteo.
- II. El residuo sólido orgánico se vacía formando un montón sobre un área plana horizontal de 4 m x 4 m de cemento pulido o similar y bajo techo.
- III. El montón de residuos sólidos se traspalea con pala hasta homogeneizarlos, a continuación, se divide en cuatro partes aproximadamente iguales A B C y D
- IV. Se eliminan las partes opuestas A y C ó B y D, repitiendo esta operación hasta dejar un mínimo de 50 kg de residuos sólidos con los cuales se debe

hacer la selección de subproductos como vegetales, fruta, comida, carne, papel, cartón, metal, plástico, etc.

- V. De las partes eliminadas del primer cuarteo se determina el peso volumétrico de los residuos sólidos "in situ", según Norma Mexicana NMX-AA-19. De manera resumida, se llena completamente un tambo de 200 L con residuo orgánico, se registra la masa contenida en el recipiente metálico con la báscula y se efectúa el cálculo del peso volumétrico, que es el cociente entre la masa del residuo y el volumen del tambo.

## ANEXO 9.2. DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS Y HUMEDAD DEL RESIDUO ORGÁNICO.

Esta prueba es una adecuación del código 2540 G del manual “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” que publica el organismo American Public Health Association. Consiste en calcular la humedad y el contenido de sólidos volátiles y fijos en muestras representativas del residuo orgánico a tratar en la Planta. La humedad es un parámetro clave en planta, el residuo tiene que cumplir con una humedad mínima del 90% para su tratamiento en el digestor húmedo, el contenido de sólidos volátiles permite estimar la producción límite de biogás por kilogramo de residuo orgánico.

### Materiales y equipo

- Balanza analítica
- Cápsulas de porcelana
- Pinzas de crisol
- Guantes especiales para mufla
- Horno de esterilización
- Horno mufla
- Desecador con gel de sílice

### Procedimiento

- I. La manipulación de las cápsulas de porcelana se debe efectuar siempre con las pinzas de crisol, no con las manos. Las manos dejan rastros de grasa que afectan la medición de la masa de las muestras.
- II. Dejar la cápsula de porcelana en horno de esterilización a 105 °C por 12 hr. (peso constante)
- III. Pasadas las 12 hr, retirar la cápsula con los guantes especiales y dejar en desecador hasta que se enfríe.
- IV. Registrar peso de cápsula de porcelana,  $m_{cap}$  (manipular siempre las cápsulas de porcelana con las pinzas de crisol).
- V. Poner en la cápsula de porcelana aproximadamente 5 g de residuo orgánico, esta cantidad se registra,  $m_{muestra}$ .
- VI. Dejar la cápsula con residuo en el horno de esterilización a 105 °C por 12 hr.
- VII. Pasadas las 12 hr., retirar la cápsula del horno de esterilización con los guantes especiales; instale la cápsula en el desecador para que se enfríe.

- VIII. Registre la masa de la cápsula, la balanza analítica le dará la lectura de la suma de las masas de la cápsula y el residuo orgánico seco,  $m_{cap+muestra-seca}$ .
- IX. Con los guantes especiales, deje la cápsula en el horno mufla a 550 °C por 20 min.
- X. Retire la cápsula del horno mufla con los guantes especiales y déjela en el desecador para que se enfríe.
- XI. Registre la masa de la cápsula, la balanza analítica le dará la lectura de la suma de las masas de la cápsula y la ceniza (residuo calcinado),  $m_{cap+muestra-calcinada}$ .
- XII. Con las masas registradas se pueden calcular los porcentajes de humedad (%H), sólidos volátiles (%SV) y sólidos fijos (%SF).

$$\%H = \frac{m_{cap} + m_{muestra} - m_{cap+muestra\ seca}}{m_{muestra}} 100$$

$$\%SV = \frac{m_{cap+muestra\ seca} - m_{cap+muestra\ calcinada}}{m_{muestra}} 100$$

$$\%SF = \frac{m_{cap+muestra\ calcinada} - m_{cap}}{m_{muestra}} 100$$

La determinación de humedad y sólidos se realiza por triplicado.

### ANEXO 9.3. DILUCIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANO (FORSU)

El residuo que se trata en el biodigestor húmedo debe cumplir con una humedad de por lo menos 90% (m/m), el residuo que llega a la Planta no cumple con esta especificación, es necesaria la adición de agua para alcanzar la humedad requerida. En esta sección se describe el cálculo de la adición de agua.

La definición de porcentaje de humedad la podemos aplicar a la FORSU de la siguiente manera:

$$\%H = \frac{\text{masa de } H_2O \text{ en la FORSU}}{\text{masa total de la FORSU}} 100 \quad \dots(1)$$

A partir de esta definición general se proponen las siguientes cantidades:

- $\%H_{act}$  es el porcentaje de humedad actual de la FORSU triturada antes de la adición de agua.
- $\%H_{ob}$  es el porcentaje de humedad objetivo de la FORSU triturada, que se logra con la adición de agua; es el porcentaje de humedad que debe tener la FORSU ( $\%H_{ob} = 90\%$ ) para poder ser alimentada al biodigestor húmedo.
- $m_{H_2O}$  = (kg de agua a adicionar)/(kg FORSU), para cumplir con la humedad requerida ( $\%H_{ob} = 90\%$ )

De la ecuación (1) podemos calcular el porcentaje de humedad objetivo de la FORSU:

$$\%H_{ob} = \frac{\frac{\%H_{act}}{100} + m_{H_2O}}{1 + m_{H_2O}} 100$$

De la expresión anterior podemos despejar  $m_{H_2O}$ ,

$$m_{H_2O} = \frac{H_{ob} - H_{act}}{100 - H_{ob}}$$

La adición de agua se calcula multiplicando  $m_{H_2O}$  por la cantidad total de FORSU a alimentar al biodigestor húmedo.

#### ANEXO 9.4. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

La demanda química de oxígeno representa la cantidad del oxígeno contenido en dicromato de potasio necesaria para oxidar la materia orgánica contenida en la muestra.

##### PRINCIPIO:

Esta determinación se basa en la oxidación de los compuestos contenidos en una muestra utilizando un oxidante fuerte, como es el dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ), en un medio fuertemente ácido y utilizando sulfato de plata ( $Ag_2SO_4$ ) como catalizador. La reacción se lleva a cabo a  $148\text{ }^\circ\text{C}$  durante 2 horas. La adición de sulfato mercúrico ( $HgSO_4$ ) permite la inactivación de los iones cloruro ( $Cl^-$ ) para que no consuman oxígeno del dicromato de potasio. El dicromato de potasio que no reacciona (restante) se determina por espectrofotometría.

##### INTERVALO:

20 a 900 mg/L

##### ERROR ESTÁNDAR:

$\pm 5\%$

##### INTERFERENCIAS

Los iones cloruro consumen oxígeno durante la reacción y por esta razón un contenido elevado de estos puede ocasionar valores altos de DQO.

##### REACTIVOS

- a. Solución de dicromato de potasio.

En un matraz aforado de 1L agregar 500mL de  $H_2O_d$  y disolver, bajo agitación continua, 10.216g de  $K_2Cr_2O_7$  (previamente secado en estufa a  $103^\circ\text{C}$  por 2h), agregar 167mL de  $H_2SO_4$  concentrado y 33.3 g de  $HgSO_4$ ; dejar enfriar y aforar a 1L con  $H_2O_d$ .

- b. b) Reactivo de  $H_2SO_4$ .

En un matraz aforado de 1L agregar 10.09 g de  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  aforar a 1 L con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado. Dejar reposar sin agitación durante el tiempo necesario hasta que el  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  se disuelva (generalmente de 1 a 2 días) en ácido sulfúrico concentrado ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )

#### PROCEDIMIENTO

- i. En un vial con tapa rosca de 10 mL se colocan 2.5 mL de la muestra y se añaden 1.5 ml de la solución de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  y 3.5mL del reactivo de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Tapar y agitar balanceando el vial.
- ii. 2. Introducir los viales en el reactor HACH por 2h a  $148^\circ \text{C}$ .
- iii. 3. Dejar enfriar a temperatura ambiente
- iv. 4. Vaciar el contenido del vial en una celda de vidrio y leer la absorbancia de las muestras a 600 nm.

Se debe leer primero el testigo para ajustar la absorbancia a cero

NOTA: Realizar las muestras por duplicado y hacer un testigo con  $\text{H}_2\text{O}_d$ .

#### CURVA DE CALIBRACIÓN

1. Preparar una solución patrón de biftalato ácido de potasio ( $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ ) que represente una concentración de 1000 mgDQO/L. En un matraz aforado de 1L disolver 0.850g de  $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$  y aforar con  $\text{H}_2\text{O}_d$ .
2. De la solución patrón se toman los volúmenes indicados en la tabla para aforarlos a 100 ml con agua destilada. Los valores correspondientes de DQO también se indican en la tabla.

Vol. de la solución patrón (mL.)	(DQO mg/L)
5	50
15	150
25	250
35	350
45	450
55	550
65	650

75	750
85	850

3. Preparar un testigo con agua destilada para fijar la absorbancia a cero en 600 nm
4. Medir la absorbancia de cada una de las diluciones
5. Elaborar una gráfica en donde aparezca la absorbancia (y) vs. la concentración(x)
6. Hacer regresión lineal para conocer el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la ecuación de la recta. El coeficiente de correlación ( $R^2$ ) deberá ser superior a 0.98.

#### CÁLCULO

$$DQO \text{ mg/L} = \frac{\text{Absorbancia} - b}{m}$$

#### REPORTE DE RESULTADOS

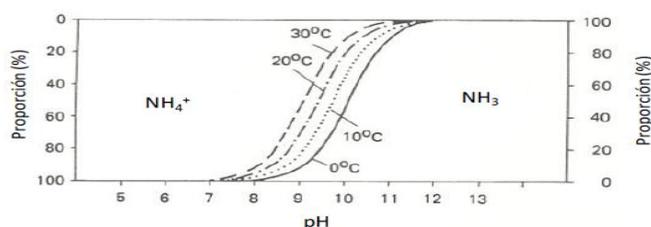
Debido a que esta determinación tiene un error estándar de 5 % como máximo, se acostumbra reportar los valores únicamente como enteros. Los resultados se reportan en unidades de mg/L (miligramos de oxígeno consumido por litro de muestra).

#### REFERENCIAS

## ANEXO 9.5. Nitrógeno amoniacal N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

### DEFINICIÓN

El nitrógeno amoniacal se encuentra en forma de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y NH<sub>3</sub>, existiendo en dependencia del pH, por lo tanto, para su determinación la muestra debe ajustarse con solución tampón a pH=9.5 y de esta manera poder cuantificar ambas especies.



### PRINCIPIO

**DETERMINACIÓN POR DESTILACIÓN:** El método se basa en la transformación del nitrógeno, contenido en una muestra, en amoníaco, en medio alcalino. La destilación de la muestra a tratar permite la separación del amoníaco (el cual se encontrará en el destilado) de los compuestos de nitrógeno orgánico. El destilado se titula con una solución de ácido sulfúrico para cuantificar el nitrógeno amoniacal.

### INTERVALO

Contenido mayor a 5 mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/L (del 10 a 20% del contenido de N-NH<sub>4</sub> en muestra).

### ERROR ESTÁNDAR

± 5 %

### INTERFERENCIAS

La glicina, urea, ácido glutámico, cianatos y acetamida, se hidrolizan muy lentamente, pero solo la urea y los cianatos se hidrolizan por destilación a pH=9.5, en cantidades alrededor de 7% y 5% respectivamente.

Compuestos alcalinos volátiles, como hidracina y aminas influyen en los resultados volumétricos.

El cloro residual reacciona con el amoniaco por lo que debe removerse por pretratamiento de la muestra.

## REACTIVOS

- a. Solución buffer de boratos 0.025N.

Adicionar 88mL de solución 0.1N de NaOH a 500mL de solución 0.025N de borato de sodio,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}_d$ , y aforar a 1L.

Solución de borato de sodio  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ . Disolver 9.5 g de  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (tetraborato de sodio) en 1 l de  $\text{H}_2\text{O}_d$ .

Solución de hidróxido de sodio 0.1 N. Disolver 4 g de NaOH (hidróxido de sodio) en 1 l de  $\text{H}_2\text{O}_d$ .

- b. Solución de NaOH 6N. En un matraz aforado de 500 ml disolver 120 g de NaOH en 200 ml de  $\text{H}_2\text{O}_d$ . Aforar a 500 ml con  $\text{H}_2\text{O}_d$ .
- c. Solución indicadora mixta. En un matraz aforado de 1L disolver 20g de  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (ácido bórico) en

$\text{H}_2\text{O}_d$  libre de amonio y adicionarle 10mL de solución indicadora mixta MERCK y aforar a 1L.

- d. Solución estándar de ácido sulfúrico 0.02N. Diluir 0.56mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado en 1L de  $\text{H}_2\text{O}_d$  y estandarizar con una solución de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  0.05N y titular a pH 5.
- e. Solución de carbonato de sodio 0.05N. En un matraz aforado de 1L disolver 2.5g de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y aforar a 1L con  $\text{H}_2\text{O}_d$ , esta solución es estable solo una semana.

## PROCEDIMIENTO

- i. Adicionar 25mL de solución buffer de boratos a una muestra de 50mL (agua residual) o de 3-5mL (muestra FORSU, lixiviado, dilución, etc).
- ii. Ajustar el pH con la solución de NaOH 6N hasta pH=9.5 (si es necesario).

- iii. Destilar la muestra durante 5 minutos utilizando el equipo destilador BÜCHI.
- iv. Recoger el destilado en 25 mL de solución indicadora de H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> (esta solución color violeta vira a color verde brillante en presencia de nitrógeno).
- v. Titular la solución recogida con la solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.02N (hasta que vire a color violeta pálido y registrar el volumen gastado).

NOTA: Realizar las muestras por duplicado y hacer un testigo con H<sub>2</sub>O.

#### CÁLCULO

$$N - NH_4^+ \text{ mg/L} = \frac{(A - B) * N * 14}{\text{volúmen de la muestra (L)}}$$

N = Normalidad de la solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

A = Vol. de solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gastado en titular la muestra (L)

B = Vol. de solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gastado en titular el blanco (L)

#### REPORTE DE RESULTADOS

Nitrógeno de amonio (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)

Ejemplos: 0.59 mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/L ó 5.7 mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/L

#### REFERENCIAS

## ANEXO 9.6. FÓSFORO TOTAL -

### DEFINICIÓN

Es la suma de los compuestos de las tres formas de fósforo en las que se puede encontrar presente en aguas residuales: ortofosfatos solubles, polifosfatos inorgánicos y fosfatos orgánicos.

### PRINCIPIO

Primero la conversión de la forma fosforada en ortofosfato disuelto, por oxidación de la materia orgánica, y después determinación colorimétrica del ortofosfato disuelto.

### INTERVALO

Límite de detección de 1.0-30.0 mg P-PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>

### ERROR ESTÁNDAR

± 0.53%

### INTERFERENCIAS

Evitar contacto de la muestra con materiales de plástico, sílice y exceso de molibdato.

### REACTIVOS

- a) Solución indicadora de fenolftaleína. Disolver 80 mg de fenolftaleína en 100 ml de metanol absoluto.
- b) Solución de hidróxido de sodio 1N. Adicionar 20 g de NaOH a 500 ml H<sub>2</sub>O<sub>d</sub>.
- c) Ácido sulfúrico concentrado.
- d) Ácido nítrico concentrado.

### PROCEDIMIENTO

1. Tomar una muestra de 1 mL (Mezcla FORSU) o una fracción diluida y depositarla en un vaso de precipitado de 100 mL.
2. Agregar 1 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado y 5 mL de HNO<sub>3</sub> concentrado.
3. Digerir hasta un volumen de 1mL y continúese hasta que la solución se vuelva incolora, para eliminar el HNO<sub>3</sub>. Dejar enfriar a temperatura ambiente.

4. Añadir 20 mL de H<sub>2</sub>O<sub>d</sub> y una gota de solución indicadora de fenolftaleína.
5. Añadir la cantidad necesaria de una solución de NaOH 1N para producir un ligero tinte rosa.
6. Transferir la solución a un matraz de 100 mL y aforar con H<sub>2</sub>O<sub>d</sub> (si la muestra está turbia es necesario filtrar utilizando un filtro de membrana de 0.45µm).
7. Determinar el fósforo colorimétricamente con el método de determinación de fósforo como ortofosfatos.

### CURVA DE CALIBRACIÓN

Se utilizará la misma que para el método de determinación de fósforo como ortofosfatos.

### CÁLCULO

$$P_{total} \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{mgP-PO^{-3}}{L} * \frac{PM(P)}{PM(PO_4^{-3})}$$

PM(P): Peso molecular promedio del fósforo

PM(PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>): Peso molecular promedio del ion ortofosfato

### REPORTE DE RESULTADOS

Fósforo Total (PT)

Ejemplos: 0.95 mg P<sub>T</sub> /L

6.6 mg P<sub>T</sub> /L

### REFERENCIAS

## ANEXO 9.7. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE ALCALINIDAD ALFA ( $\alpha$ )

Este parámetro da información de la estabilidad del biodigestor húmedo, permite saber si este equipo sigue en condiciones para continuar su alimentación sin riesgo de acidificación. Es una titulación en dos lecturas de pH (4.3 y 5.75) con una solución de ácido fuerte diluido (generalmente con una concentración 0.1 N), en la planta se usa una solución de ácido sulfúrico 0.08 N.

### 1. MATERIALES Y EQUIPO

- En la Planta Piloto de Biodigestión Anaerobia se emplea el siguiente material:
  - -Tres vasos de precipitado de 50 mL
  - -Solución de ácido sulfúrico 0.08 N
  - -Bureta graduada de 50 mL
  - -Potenciómetro

### 2. PROCEDIMIENTO

- I. -Se toma un volumen aproximado de 5 mL de inóculo del biodigestor en un vaso de precipitado de 50 mL
- II. Con el potenciómetro se registra el pH del inóculo contenido en el vaso de precipitado, el pH debe ser mayor a 7.
- III. Se llena la bureta con la solución de ácido sulfúrico 0.08 N
- IV. -Se efectúa la titulación hasta llegar a pH=5.75, se registra el volumen de solución de ácido para llegar a ese valor de pH ( $V_{pH=5.75}$ )
- V. -Se continúa la titulación hasta llegar a pH=4.3. Se registra el volumen de solución de ácido para llegar al valor de 4.3 ( $V_{pH=4.3}$ )
- VI. Se calcula el índice de alcalinidad alfa ( $\alpha$ ) con los volúmenes registrados:

$$\alpha = \frac{V_{pH=5.75}}{V_{pH=4.3}}$$

- VII. La determinación del índice alfa ( $\alpha$ ) se hace por triplicado
- a. Un valor de alfa ( $\alpha$ ) cercano a la unidad indica que el biodigestor está en condiciones de estabilidad y se puede seguir alimentándolo. Si se observa un valor de alfa ( $\alpha$ ) inferior a 0.7, el digestor está en riesgo de acidificación y hay que suspender la alimentación.

#### ANEXO 9.8. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

En promedio, el motogenerador consume 4.56 m<sup>3</sup> de biogás por hora de operación. La potencia del equipo es de 8 kW y su eficiencia es del 85%. Con base a esta información, la generación de electricidad se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Generación de electricidad (kWh)} = 0.85 \left( \frac{8kW}{4.56 \frac{m^3}{h}} \right) Q = \frac{85 kWh}{57 m^3} Q$$

Q es el volumen de biogás consumido por el motogenerador en m<sup>3</sup>.

## 10.REFERENCIAS

- Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S. & Janssen, R., 2008. Biogas Handbook, University of Southern Denmark Esbjerg, Dinamarca, 125 pp.
- Alibardi, Luca & Cossu, Raffaello. (2015). Effects of carbohydrate, protein and lipid content of organic waste on hydrogen production and fermentation products. Waste management (New York, N.Y.). 47.
- ANAPO, 2011. Gestión de residuos y contaminación de aguas, Santa Cruz, Bolivia
- Angelidaki, I., Sanders, W. (2004). Assessment of the Anaerobic biodegradability of micropollutants. Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology 3, 117-129.
- Angenent L. T., Sung S., Raskin L. (2002). "Methanogenic population dynamics during start up of a full-scale anaerobic sequencing batch reactor treating swine waste". Water Research 36, 4648-4654.
- APHA, Standard Methods for the examination of water and wastewater, American Public Health Association, 20th ed., Washington DC (1998).
- Arsova, L., 2010. Anaerobic digestion of food waste. Current status, problems and an alternative product, Tesis de maestría, Department of Earth and Environmental Engineering, Columbia University 77 pp.
- ATSDR.(2001). Department of Health and Human Services Agency for Toxic Substances. Salud:Producción de gases en vertederos sanitarios: U.S. Department de Salud y los Servicios Humanos.Noviembre de 2001.
- Axpo Kompogas Ltd., 2012. Axpo Kompogas. [En línea] Available at: <http://www.axpokompogas.ch>
- Barlaz M. A. (1998). "Microbial studies of landfills and anaerobic refuse decomposition". Chapter of Manual of Environmental Microbiology, ASM Press Washington D. C, 541-557.

- Barros Vicente (2006), Cambio climático global, Edit. Libros del Zorzal, Buenos Aires
- BEKON Energy Technologies, 2012. BEKON. [En línea] Available at: <http://www.bekon.eu/>
- Bekon references and current contracts, <http://www.bekon.eu/en/references/>
- Biotec, 2011. Castelleone Plant Description Report, Castelleone: Biotec
- Biotec, 2011. Castelleone Plant Description Report, Castelleone: Biotec.
- BÖRJESSON G, GALLE B, SAMUELSSON J.y SVENSSON B. H. (2000) Emisiones De Rellenos Sanitarios: Opciones Para El Monitoreo Y Control , Este documento fue presentado por primera vez en la Conferencia Waste 2000 en Stratfordupon-Avon 2-4 de Octubre de 2000 (Proc. pp. 31-40) [Consultado: 17 - 06 -2009] [http://www.radioclima.org/upimages/files/4745b65c3db7b\\_12.pdf](http://www.radioclima.org/upimages/files/4745b65c3db7b_12.pdf)
- Bozano, P., 2009. Practical experiences in the production of biogas and energy from wastes, Génova: Biotec Sistemi.
- Braber, K., 1995. Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste: A modern waste disposal option on the verge of breakthrough. Biomass and Bioenergy 19: 365-376.
- Breure A. M. (1986). "Hydrolysis and acidogenesis fermentation of protein and carbohydrates in anaerobic waste water treatments". Off setduikkerij. Kanters B. V, Alblasterdam.
- BTA International, 2010. BTA International GmbH. [En línea] Available at: <http://www.btainternational>.
- Christensen, T. H.; Cossu, R. y Stegmann, R. "Landfilling of Waste: Biogas" ISBN 0419 19400 2, E&FN Spon, Londres, 1996.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) 2017, Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación ;<http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=plantasTratamiento&ver=eporte>.
- CONAPO, 2003. Proyecciones de población 2000-2050, Ed. Consejo Nacional de Población. México, D.F. pp. 6-32.

- Crawford, JF y Smith PG, (1985). Landfill technology, Ed. Butterworths, London, 4 edition 2007
- De Baere, L., 2006. The Dranco Technology. A Unique Digestion Technology for Organic Waste, Bruselas: Organic Waste Systems.
- Deublein, D. D. & Steinhauser, A. S., 2008. Biogas from Waste and Renewable Resources, An Introduction. WILEY-VCH Verlag GmbH y Co. kGaA, Alemania, 450 pp.
- DiLallo R., Albertson O. E. (1961) Volatile Acids by Direct Titration. Water Pollution Control Federation, 33 (4), 356-365
- Durán A M, Casa D., Rojas U., Roa M., Vázquez G., Alcántara R.. (2014). Fundamentos de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos. Ciudad de México.
- Estela M.C. , 2008 Tesis Doctoral “Estudio técnico económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás”, Universidad Politécnica de Madrid.
- Fernández.J.R., (2010), Tesis de doctorado Optimización de la digestión anaerobia seca de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura
- Forster, C. T., 2005. Digestión anaerobia termofílica seca de Residuos Sólidos Urbanos: Estudio de las variables del proceso en el arranque y estabilización del bio-reactor. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz, España, 400 pp.
- Gómez Orea, Domingo (2004), Recuperación de espacios degradados. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Holliger C., Alves M., Andrade D., Angelidaki I., Astals S., Baier U., Bougrier C., Buffier P., Carballa M., Wilde V., Ebertseder F., Fernandez B., Ficara E. et al. 2016. Towards a standardization of biomethane potential tests. Water Sciene & Technology 16 1-9.
- INECC, Semarnat. Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos. INECC, Semarnat. México. 2012.

- Jenkins S.R., Morgan J.M., Sawyer C.L. (1983) Measuring anaerobic sludge digestion and growth by a simple alkalimetric titration, Water Pollution Control Federation, 55(5), 448-453.
- Jeris, J. S.; McCarty P. L. (1965). "The biochemistry of methane formation using <sup>14</sup>C tracers". Journal WPCF, 37(2), 178.
- Korz, D., 2010. Anaerobic Digestion and Biogas Upgrading, Ros Roca SA.
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN, 2003. México, D.F.
- López Hernández J.E., Morgan Sagastume J.M. y Noyola Robles A. (2000), arranque de reactores anaerobios industriales: dos casos de estudio. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
- Lutz, P., 2012. New BEKON Biogas Technology for Dry Fermentation in Batch Process, Unterföhring: BEKON Energy Technologies GmbH & Co
- McCarty P. L. (1981). "One hundred years of anaerobic treatment" Ed D. E. Hughes et al. Elsevier Biomedical Press, 3-22.
- McCarty, P. L. 1964. Anaerobic waste treatment fundamentals. Part III: Toxic materials and their control. Public Works 91-94.
- Monson, D. K., Esteves, R. S., Guwy J. A. & Dinsdale M. R., 2007. Anaerobic Digestion of Biodegradable Municipal Wastes: A Review. Sustainable Environment Research Center, University of Glamorgan, Gales, 366 pp.
- Mosey, F. E. (1974). "Anaerobic biological treatment". Treat. Wastes Food Drink Ind., Proc.Symp., 113-128.
- Nayono, Satoto & Winter, Josef & Gallert, Claudia. (2009). Anaerobic digestion of pressed off leachate from the organic fraction of municipal solid waste. Waste management (New York, N.Y.).
- NMX-AA-15-1985. Norma Mexicana. "Protección al ambiente- contaminación del suelo - residuos sólidos municipales - muestreo - método de cuarteo". Diario oficial de la federación, 6 de Noviembre de 1992.
- NMX-AA-19-1985. Norma Mexicana. "Protección al ambiente -contaminación del suelo - residuos sólidos municipales - peso volumétrico "IN SITU". Diario oficial de la federación, 6 de Noviembre de 1992.

- NMX-AA-22-1985. Norma Mexicana. “Protección al ambiente - contaminación del suelo - residuos sólidos municipales - selección y cuantificación de subproductos.”. Diario oficial de la federación, 6 de Noviembre de 1992.
- NOM-010-STPS-2014. Norma Oficial Mexicana. “Agentes químicos contaminantes del ambiente laboral-Reconocimiento, evaluación y control”. Diario oficial de la federación, 28 de abril de 2014.
- NOM-083-SEMARNAT-2003. Norma Oficial Mexicana. “Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial”. Diario oficial de la federación, 04 de agosto del 2015
- Organic Waste Systems, 2013. OWS Organic Waste Systems. [En línea] Available at: <http://www.ows.be>
- Ostrem, K., 2004. Greening Waste: Anaerobic Digestion for Treating the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. Tesis de maestría, Department of Earth and Environmental Engineering, Columbia University, 54 pp.
- Palmisano, A. C., Barlaz, M. A., 1996. Microbiology of solid waste. Edición ilustrada, CRC Press, Inc. EEUU.
- Palmowski L. M., Muller J. A. (2000). “Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic digestion”. Water Science and Technology 41(3), 155-162.
- Partl, H., 2007. KOMPOGAS Process Description and Costings, Sydney: Hyder Consulting.
- Pérez A., Torres P. 2008. Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables. Ingeniería y Competitividad, Vol. 10, p. 41-52.
- Pérez, J., 2010. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Tesis profesional, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 77 pp.
- Periódico Oficial, Gaceta del Gobierno, Gobierno del Estado libre y soberano de México, 31 de diciembre del 2018. Pp169.
- Ramalho, A., 2013. Weltec Biopower. México D.F., s.n.

- Rapport, J., Zhang, R., Jenkins, B. M. & Williams, R. B., 2008. Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste. University of California, Davis, Contractor Report to the California Integrated Waste Management Board, 90 pp.
- Ratledge, C. (1991). "Microorganisms for lipids". *Acta Biotechnologica*, 11(5), 429-38.
- Ratledge, C. (1991). "Microorganisms for lipids". *Acta Biotechnologica*, 11(5), 429-38.
- Ripley L.E., Boyle W.C., Converse J.C. (1986), Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. *Water Pollution Control Federation*. 58 (5), 406-41.
- Ros Roca SA, 2013. Ros Roca environment. [En línea] Available at:<http://www.rosroca.com>.
- SAGARPA, 2007. Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario.
- Schink, A. (1997) "Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation". *Microb. Mol. Biol.* 61, 262-280
- Schnürer, A. & Jarvis, A., 2009. *Microbiological Handbook for Biogas Plants*, Malmö: Svenskt Gastekniskt Centre AB.
- Schulte, B., 2013. Experiencias with the operation of different dry digesters. México D.F., s.n.
- SEDESOL, (Secretaría de Desarrollo Social) 2001. Manual técnico-administrativo para el servicio de limpia municipal, D.F., México, 132 pp.
- SEMARNAT, 2015, Informe de la situación del medio ambiente en México. compendio de estadísticas ambientales. indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde. edición 2015.
- SENER, 2012, "Prospectiva de energías Renovables 2012-2026"
- SENER, 2015, "Prospectiva del sector eléctrico 2015-2029" SENER, 2015."Prospectiva del Sector Eléctrico 2015-2029",
- SENER, 2017."Prospectiva del Sector Eléctrico 2017-2031".,

- Servicio Meteorológico Nacional (SMN), 2013. Condiciones normales meteorológicas 1971-2000 correspondientes al Estado de México, estación 00015047, Las Arboledas. Tlalnepantla.
- Sparling R., Risbey D., Poggi-Varaldo H. M. (1997). "Hydrogen production from inhibited anaerobic composters". *International Journal of Hydrogen Energy* 22(6), 563-566.
- Speece, R. E., *Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters*. Archae Press, Nashville (1996).
- Spin, 2011. Sustainable production through innovation in SME's. [En línea] Available at:<http://spin-project.eu>.
- Strabag Umwelanlagen GmbH, 2011. Strabag Umwelanlagen. [En línea] Available at:
- Tchobanoglous, G., 1994. *Integrated Solid Waste Management. Engineering Principles and Management Issues*, Mc Graw-Hill. Nueva York.
- Tsilemou, K. & Panagiotakopoulos D., 2006. Approximate cost functions for solid waste treatment facilities. *Waste Management Res.* 24: 310-322.
- Valdez-Vazquez I, Rios-Leal E, Esparza-Garcia F, Cecchi F, Poggi-Varaldo HM. (2005). "Semicontinuous solid substrate anaerobic reactors for H<sub>2</sub> production from organic waste: Mesophilic versus thermophilic regime". *International Journal of Hydrogen Energy* 30(13-14): 1383-1391.
- Valorga International SAS., 2007. Valorga International. [En línea] Available at: <http://www.valorgainternational.fr>
- VALORGAS., 2010. Compositional analysis of food waste from study sites in geographically distinct regions of Europe. MTT Agrifood Research Finland (Maa Ja Elintarviketalouden Tutkimuskeskus). VALORGAS Project. Finland. <http://www.valorgas.soton.ac.uk/deliverables.htm> (última consulta, 31-01-2015).
- Vandevivere, P., Verstraete, W. & De Baere, 2003. Types of anaerobic digesters for solid wastes. En: Mata-Alvarez,J.(ed.). *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. Barcelona: IWA publishing, pp. 111-140.

- Varnero, M. M. T., 2011. Manual de Biogás. Proyecto CHI/00/G32 “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables” Santiago de Chile, 120 pp.
- Verma, S., 2002. Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solids Wastes. Tesis de maestría. Department of Earth & Environmental Engineering, Columbia University. 50 pp.
- Weltec Biopower GmbH, 2012. Weltec Biopower. [En línea] Available at: <http://www.weltecbiopower.com/>
- Weltec Biopower, 2008. [En línea] Available at: <http://www.miwea.org/docs/Municipal%20Biogas%20Presentation.pdf>